

Pontificia Universidad Católica del Perú
Escuela de Posgrado



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**Ensayo de flat jack como herramienta para la determinación del
comportamiento mecánico de construcciones de adobe**

Tesis presentada para obtener el Grado de Magister en

INGENIERÍA CIVIL

Obtenido en el marco del Programa de Maestría en Ingeniería Civil

por

Kiyoshi Tacas Guillen

Asesor

Dr. Rafael Aguilar V.

Mayo 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero mostrar mi agradecimiento a todas las personas y entidades que hicieron que esta investigación sea posible, las mismas que me apoyaron incondicionalmente y me ayudaron a ser una mejor persona. Quiero mostrar un especial agradecimiento a:

- Mis padres y hermano, gracias por el apoyo, la confianza y el ejemplo que me brindaron, sin ustedes todo esto no hubiese sido posible. Finalmente, a mis tíos, primos y familia me queda agradecerles la confianza depositada en mí y decirles que no los defraudaré, gracias.
- Mi asesor de tesis, Dr. Rafael Aguilar, por su guía durante todo este proceso, por todos sus comentarios y recomendaciones que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.
- Convenio de gestión N°232-2015-FONDECYT y la Pontificia Universidad Católica del Perú por la beca que me otorgaron para mis estudios de posgrado.
- Dirección Académica de Responsabilidad Social (DARS), por la provisión de fondos para el desarrollo del proyecto.
- Sala VEO 3D digital manufacturing, PUCP por el financiamiento e impresión en 3D de soportes para LVDTs y accesorios utilizados en los ensayos de esta esta investigación.
- Mis amigos y compañeros del laboratorio Engineering & Heritage, gracias a ustedes pude superar diversos obstáculos y logré salir adelante. Agradecer en especial a Mauricio, Pablo y Jhomayra; con quienes compartí la mayoría de cursos de la maestría.
- Laboratorio de Estructuras de la PUCP por permitirme realizar los ensayos en sus instalaciones.
- Mis grandes amigos y amigas, aquellos con los que compartí los mejores momentos en la universidad y en la vida, personas muy especiales que siempre me apoyaron en todo. No me gustaría comenzar a nombrarlos y olvidarme de alguno, pues considero que todos ustedes ya forman parte de mi vida, les estaré eternamente agradecido.

RESUMEN

Las construcciones históricas representan el legado de una nación debido a su gran importancia histórica y son generadoras de ingresos económicos por la actividad turística que atraen. En el Perú existe una gran cantidad de construcciones patrimoniales de mampostería de adobe. La fragilidad de este material y el elevado peligro sísmico en nuestro país hacen que la conservación y preservación de estas estructuras sean de gran importancia. Para ello es necesario conocer las propiedades mecánicas del material que compone su sistema estructural. La dificultad para obtener dichas propiedades radica en que las construcciones históricas no permiten que se ejecuten intervenciones que dañen el patrimonio mediante ensayos destructivos. Por ello, los ensayos no destructivos y semi destructivos se adecúan a este tipo de estructuras. El ensayo de flat jack es un procedimiento semi destructivo que consiste en simular el ensayo de compresión simple en una sección de mampostería de la estructura. Es necesario retirar una porción de junta de mortero para insertar los flat jacks, que son planchas de acero soldadas, y poder suministrar presión mediante una bomba hidráulica. Las deformaciones en la sección a ensayarse son monitoreadas durante el ensayo. Con este ensayo es posible conocer el estado de tensiones de un área local de la estructura, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la mampostería de la estructura.

El principal objetivo de esta tesis de investigación es conocer el comportamiento mecánico de construcciones de adobe. Para ello, se realiza una campaña experimental del ensayo de flat jack sobre dos muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal. Adicionalmente se obtuvieron las propiedades mecánicas de prismas de adobe y ladrillo artesanal mediante el ensayo a compresión simple con el objetivo de comparar resultados con los obtenidos por el ensayo de flat jack. Finalmente, se determinó el comportamiento mecánico del caso de estudio de la iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca mediante el ensayo de flat jack. Los resultados obtenidos muestran que el ensayo de flat jack es adecuado para determinar las propiedades mecánicas de estructuras de adobe existentes. El daño generado por el ensayo en las juntas de mortero fue temporal y fácilmente reparable rellenando las hendiduras con material de características similares al original.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	vii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación.....	2
1.2. Estado del arte.....	2
1.3. Componentes del equipo	4
1.4. Objetivos	6
1.5. Organización.....	7
CAPÍTULO 2. ENSAYO DE FLAT JACK PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE Y LADRILLO ARTESANAL EN LABORATORIO	9
2.1. Introducción	10
2.2. Ensayo de compresión para determinar las propiedades mecánicas de prismas de mampostería de adobe y ladrillo artesanal.....	10
2.3. Aplicación del ensayo de flat Jack en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal.....	12
2.3.1. Metodología	12
2.3.2. Descripción de los muros de mampostería y configuración inicial del ensayo ...	13
2.3.3. Procedimiento del ensayo de flat jack simple	14
2.3.4. Procedimiento del ensayo de flat jack doble	15
2.4. Resultados y discusión.....	16
2.4.1. Ensayo de flat jack simple.....	16
2.4.2. Ensayo de flat jack doble	19
2.5. Modelamiento numérico.....	21
2.5.1. Ensayo de flat jack simple.....	22
2.5.2. Ensayo de flat jack doble	24
2.6. Conclusiones.....	26
CAPÍTULO 3. ENSAYO DE FLAT JACK PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE CONSTRUCCIONES DE ADOBE: EL CASO DE LA IGLESIA VIRGEN DE LA ASUNCIÓN DE SACSAMARCA.....	28
3.1. Introducción	29
3.2. Ensayos de flat jack	29
3.3. La iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca	30

3.3.1.	Localización de los ensayos	31
3.3.2.	Procedimiento del ensayo de flat jack simple	32
3.3.3.	Procedimiento del ensayo de flat jack doble	33
3.4.	Resultados y discusión.....	34
3.4.1.	Ensayo de flat jack simple.....	34
3.4.2.	Ensayo de flat jack doble	35
3.5.	Conclusiones.....	37
CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA REALIZAR ENSAYOS DE FLAT JACK SIMPLE Y DOBLE EN CONSTRUCCIONES DE ADOBE		39
4.1.	Lecciones aprendidas en los ensayos de caracterización de mampostería de adobe	40
4.1.1.	Lecciones de ensayos en laboratorio.....	40
4.1.2.	Lecciones de ensayos en campo.....	41
4.2.	Propuesta de metodología para la aplicación de ensayos de flat jack en construcciones de adobe.....	41
4.2.1.	Flat jack simple	42
4.2.2.	Flat jack doble.....	44
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....		48
5.1.	Conclusiones.....	49
5.2.	Trabajo futuro	50
REFERENCIAS.....		52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Dispositivos flat jack de 400 x 200 mm y 6 mm de espesor (a) representación esquemática y (b) flat jacks suministrados por DRC Italia.....	4
Figura 1.2. Sistema de bombeo (a) Bomba de presión hidráulica y (b) Bypass y mangueras de conexión.....	4
Figura 1.3. Monitoreo de desplazamientos mediante LVDTs. (a) Transductor de desplazamiento (LVDT), (b) Dispositivo de adquisición y (c) Procesamiento de datos.....	5
Figura 1.4. Soportes para LVDTs (a) Modelos generados en formato .stl y (b) Modelos impresos en material ABS por la sala VEO 3D.....	5
Figura 1.5. Monitoreo de desplazamientos mediante DIC (a) Equipo de cámaras para la toma de datos, (b) Área de ensayo monitoreada por el DIC y (c) Procesamiento de datos con ambas cámaras (izquierda y derecha).....	6
Figura 2.1. Ensayo de compresión en (a) prismas de adobe y (b) prismas de ladrillo artesanal.11	11
Figura 2.2. Curvas de esfuerzo – deformación de (a) prismas de adobe y (b) prismas de ladrillo artesanal.....	11
Figura 2.3. Precarga de los muros de mampostería para los ensayos de flat jack. a) Muro de mampostería de adobe, b) muro de mampostería de ladrillo, c) aplicación de carga sobre el muro de mampostería de adobe, and d) aplicación de carga sobre el muro de mampostería de ladrillo artesanal.....	14
Figura 2.4. Ensayo de flat jack simple para determinar el estado de tensiones en un área del muro de mampostería: (a) representación esquemática, (b) distribución de LVDTs y (c) área para monitoreo de desplazamiento usando DIC.....	14
Figura 2.5. Instrumentación del ensayo de flat jack doble: (a) Perforado de la hendidura para la inserción del segundo flat jack, (b) pintado de la superficie y ubicación de los puntos de referencia y (c) ensayo de flat Jack doble instrumentado con LVDTs y DIC.....	15
Figura 2.6. Ensayo de flat jack doble para determinar las curvas esfuerzo – deformación de la mampostería: (a) Representación esquemática, (b) distribución de los LVDTs y (c) área para el monitoreo de desplazamientos usando DIC.....	15
Figura 2.7. Diagrama de la evolución de deformaciones en el ensayo de flat jack simple en el muro de mampostería de adobe utilizando a) LVDTs, y b) DIC.....	16
Figura 2.8. Diagrama de la obtención del estado de tensión local en el ensayo de flat jack simple llevada a cabo en el muro de mampostería de adobe utilizando a) LVDTs, y b) DIC.....	17
Figura 2.9. Diagrama de la evolución de deformaciones en el ensayo de flat jack simple en el muro de ladrillo artesanal utilizando a) LVDTs, y b) DIC.....	17
Figura 2.10. Diagrama de la obtención del estado de tensión local en el ensayo de flat jack simple llevada a cabo en el muro de mampostería de ladrillo artesanal utilizando a) LVDTs, y b) DIC.....	18
Figura 2.11. Diagrama de monitoreo de esfuerzo – deformación en el ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de adobe. Utilizando a) LVDTs y b) DIC.....	20
Figura 2.12. Diagrama de esfuerzo – deformación en el ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de ladrillo artesanal. Utilizando a) LVDTs y b) DIC.....	20
Figura 2.13. Implementación de la malla de EF del ensayo de flat jack: (a) Ubicación de los flat jacks, (b) distribución de puntos de referencia en el ensayo de flat jack simple, y (c) distribución de puntos de referencia en el ensayo de flat jack doble.....	21

Figura 2.14. Desplazamientos verticales (m) de los nodos en el modelamiento numérico del ensayo de flat jack simple en la mampostería de adobe. (a) Desplazamientos verticales iniciales, (b) desplazamientos después de la realización de la hendidura, y desplazamientos debidos a una presión suministrada en la ranura de (c) 0.1 MPa, (d) 0.2 MPa, (e) 0.3 MPa y (f) 0.4 MPa.....	22
Figura 2.15. Diagrama de monitoreo de deformación del modelado numérico del ensayo de flat jack simple en el muro de mampostería de adobe a) Evolución de las deformaciones y b) Obtención del estado local de tensión	23
Figura 2.16. Esfuerzos de compresión (Pa) en el área de ensayo del modelamiento numérico del ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de adobe. (a) Esfuerzos de compresión debido a una carga de 100 kN sobre el muro, (b) esfuerzos de compresión después de realizarse ambas hendiduras y esfuerzos de compresión debido a una presión suministrada en ambas hendiduras de (c) 0.1 MPa, (d) 0.2 MPa, (e) 0.3 MPa y (f) 0.4 MPa	24
Figura 2.17. Diagrama del monitoreo de esfuerzo – deformación del modelamiento numérico del ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de adobe.....	25
Figura 3.1. Iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca: (a) Vista exterior, (b) vista interior, (c) vista en planta y (d) sección transversal A-A.....	31
Figura 3.2. Ubicación de los ensayos de flat jack en la iglesia (a) vista en planta, (b) fachada este y (c) fachada norte.....	32
Figura 3.3. Instrumentación del ensayo de flat jack simple: (a) Acondicionamiento de la superficie y ubicación de los puntos de referencia, (b) Perforado de la hendidura para la inserción del flat jack, y (c) Ensayo de flat jack instrumentado	32
Figura 3.4. Ensayo de flat jack simple para determinar el estado de tensión local de la mampostería: (a) representación esquemática y (b) campaña experimental	33
Figura 3.5. Instrumentación del ensayo de flat jack doble en la iglesia: (a) Perforado de la hendidura para la inserción del segundo flat jack, (b) instrumentación de LVDTs y (c) ensayo de flat jack instrumentado	33
Figura 3.6. Ensayo de flat jack doble para determinar el comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería de la iglesia: (a) representación esquemática y (b) campaña experimental	34
Figura 3.7. Diagrama de monitoreo de deformación en el ensayo de flat jack simple en la fachada norte a) Evolución de deformaciones y b) obtención del estado local de la tensión	34
Figura 3.8. Diagrama de monitoreo de deformación en el ensayo de flat jack simple en la fachada este a) Evolución de deformaciones y b) obtención del estado local de la tensión	35
Figura 3.9. Diagrama del monitoreo de esfuerzo – deformación del ensayo de flat jack doble en la fachada norte de la iglesia. Evolución de a) deformaciones verticales y b) deformaciones horizontales	36
Figura 3.10. Diagrama del monitoreo de esfuerzo – deformación del ensayo de flat jack doble en la fachada este de la iglesia. Evolución de a) deformaciones verticales y b) deformaciones horizontales	36
Figura 4.1. Metodología para la obtención del nivel de tensión local en una construcción de mampostería de adobe utilizando el ensayo de flat jack simple.....	42
Figura 4.2. Representación esquemática de la ubicación de los puntos de referencia en el ensayo de flat jack simple.....	43
Figura 4.3. Metodología para la obtención del comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería de una construcción de adobe utilizando el ensayo de flat jack doble.....	45
Figura 4.4. Representación esquemática de la ubicación de los puntos de referencia en el ensayo de flat jack doble	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Módulos de elasticidad de los prismas de adobe y ladrillo artesanal obtenidos mediante el ensayo de compresión.....	11
Tabla 2.2. Longitud inicial entre puntos de referencia en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal para los ensayos de flat jack simple	16
Tabla 2.3. Estado de tensión obtenido en muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal mediante los ensayos de flat jack simple.....	19
Tabla 2.4. Longitud inicial entre puntos de referencia en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal para el ensayo de flat jack doble	19
Tabla 2.5. Módulo de elasticidad obtenido mediante el ensayo de flat jack doble en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal.....	21
Tabla 2.6. Estado de tensión obtenido mediante el modelamiento numérico del ensayo de flat jack simple.....	23
Tabla 2.7. Módulo de elasticidad obtenido mediante el modelamiento numérico del ensayo de flat jack doble	25
Tabla 3.1. Longitud inicial entre puntos de referencia en ambas fachadas para los ensayos de flat jack simple.....	34
Tabla 3.2. Estado de tensiones en las fachadas norte y este de la iglesia	35
Tabla 3.3. Longitud inicial entre puntos de referencia en ambas fachadas de la iglesia para el ensayo de flat jack doble	36
Tabla 3.4. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de la mampostería de adobe de la iglesia obtenidos mediante los ensayos de flat jack doble.....	37

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



Resumen. En este capítulo se presenta la motivación y justificación para realizar esta tesis de investigación. Además, se describe brevemente las campañas experimentales en el laboratorio y en el caso de estudio. Luego, se presenta el estado de arte del ensayo de flat jack describiendo su naturaleza y presentando los casos más resaltantes de su aplicación en construcciones de mampostería. Finalmente, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos que serán desarrollados a lo largo de esta investigación.

1.1. Motivación

El Perú cuenta con un gran legado de construcciones patrimoniales dejado por civilizaciones a lo largo del tiempo, las cuales además de representar la identidad cultural de nuestro país son fuentes de ingresos por el turismo. Asimismo, debido a la gran actividad sísmica que presenta el Perú y a la fragilidad del adobe que compone la mayoría de este tipo de estructuras, es necesario realizar tareas de conservación de patrimonio [1]. Para ello, es necesario determinar el comportamiento estructural de estas construcciones, específicamente conocer las propiedades mecánicas del material que conforma su sistema estructural.

En esta investigación, se desarrolló una campaña experimental utilizando ensayos de flat jack aplicados en muros de mampostería, los resultados son comparados con los del ensayo de compresión simple uniaxial en prismas elaborados con el mismo material. Para el monitoreo de deformaciones se utilizaron transductores de desplazamiento (LVDT) y una técnica de medida de la deformación no intrusiva óptica en 3D basada en la correlación digital de imágenes (DIC) implementado en el sistema ARAMIS 5M [2]. Finalmente, se elaboraron modelos numéricos de los ensayos de flat jack aplicados en los muros de mampostería para comparar sus resultados con los obtenidos experimentalmente.

El caso de estudio abordado en esta tesis fue la iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca que data de las últimas décadas del siglo XVI, ubicada en el distrito de Sacsamarca, provincia de Huanca Sancos y región de Ayacucho. Este templo destaca por ser una de las cinco primeras parroquias de indios erigidas en la ciudad de Ayacucho [3]. Además es una de las expresiones más resaltantes del arte barroco y conserva lienzos del célebre pintor indígena Diego Quispe Tito, motivo por el cual el Instituto Nacional de Cultura reconoció a la iglesia como patrimonio cultural de la nación en el año 2000 [3].

1.2. Estado del arte

El ensayo de flat jack es un método in-situ para determinar las propiedades mecánicas del material de una estructura. El ensayo es considerado un ensayo ligeramente destructivo (MDT) pues el daño generado es temporal y fácilmente reparable [4]. La técnica del flat jack fue adaptada de la mecánica de rocas por el investigador italiano Paolo Rossi a

principios de la década de 1980 [5]. Una de las primeras aplicaciones in situ del ensayo de flat jack en edificios patrimoniales fue en los muros de ladrillo del Palazzo della Ragione en Milán [6]. En investigaciones recientes, esta técnica fue utilizada por [7] como parte de un análisis de fallas y el diseño de reforzamiento de puentes históricos de mampostería. En tanto, [8] presenta una metodología del ensayo de flat jack in-situ utilizando varios métodos de medición de desplazamientos.

En la actualidad existen dos normativas para la evaluación de mampostería mediante el ensayo de flat jack. Las prácticas europeas siguen las normativas definidas por la Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (RILEM), aprobadas en 1990 [9] [10]. En Estados Unidos, las normativas del procedimiento del ensayo de flat jack fueron desarrolladas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) y aprobadas en 1991 [11] [12]. El ensayo de flat jack se divide en dos etapas, el ensayo de flat jack simple y doble, que se describen a continuación.

El ensayo de flat jack simple se basa en el principio de liberación de tensión debido al corte de una hendidura horizontal en la junta de mortero de la mampostería. La liberación de tensión en ese punto produce un acercamiento entre la mampostería sobre y bajo la hendidura. El nivel de tensión en la mampostería puede medirse insertando un dispositivo de flat jack en la hendidura y aumentando su presión interna hasta que se restaure la distancia original entre puntos de referencia posicionados sobre y bajo la hendidura [11].

El ensayo de flat jack doble permite determinar el comportamiento esfuerzo-deformación de la mampostería existente insertando dos dispositivos flat jack en hendiduras paralelas, una encima de la otra, en un muro de mampostería. Al aumentar gradualmente la presión interna en los flat jacks, se aplica un esfuerzo de compresión controlado a la porción de mampostería entre los flat jacks. El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la mampostería se pueden obtener midiendo las deformaciones verticales y horizontales en los puntos de referencia colocados en la mampostería entre los flat jacks [12].

1.3. Componentes del equipo

Dispositivos flat jacks

Los dispositivos flat jacks son células de presión con un puerto de entrada y otro de salida. Están compuestos de dos placas de acero inoxidable las cuales están soldadas a lo largo de su perímetro. Estos dispositivos pueden ser presurizados mediante mangueras y una bomba hidráulica. Como se muestran en la Figura 1.1, los dispositivos utilizados en esta investigación fueron de 400 x 200 mm y 6 mm de espesor.

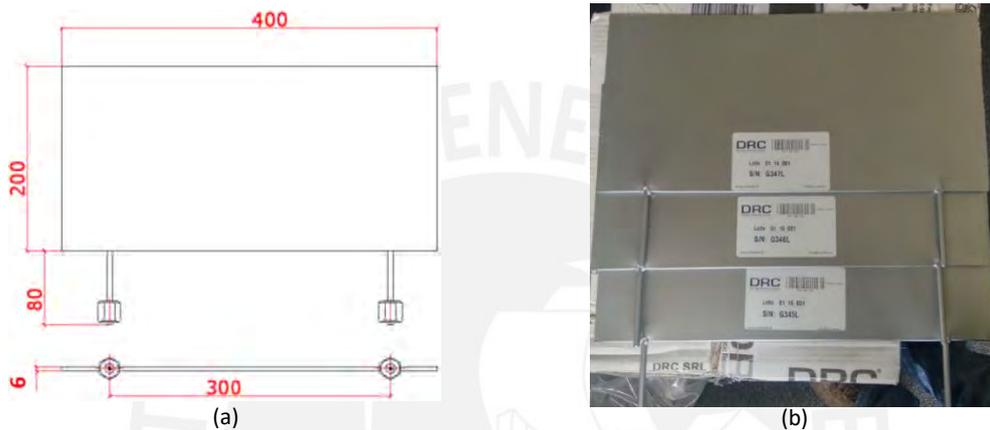


Figura 1.1. Dispositivos flat jack de 400 x 200 mm y 6 mm de espesor (a) representación esquemática y (b) flat jacks suministrados por DRC Italia.

Sistema de bombeo

El sistema de bombeo está compuesto de una bomba de presión hidráulica conectada a mangueras mediante un bypass con válvulas y acoplamientos para cada manguera. Estas mangueras serán conectadas directamente a cada flat jack. Adicionalmente se cuenta con un manómetro digital con una capacidad de medición de 10 MPa. En la Figura 1.2 se presenta el sistema de bombeo, el bypass y las mangueras de conexión.



Figura 1.2. Sistema de bombeo (a) Bomba de presión hidráulica y (b) Bypass y mangueras de conexión.

Transductores de desplazamiento (LVDTs)

Se utilizaron LVDTs con un rango de medición de ± 5 mm y una precisión de 10^{-3} mm. En la Figura 1.3 se presentan los LVDTs utilizados, el dispositivo de adquisición SCXI y el equipo de adquisición de datos.

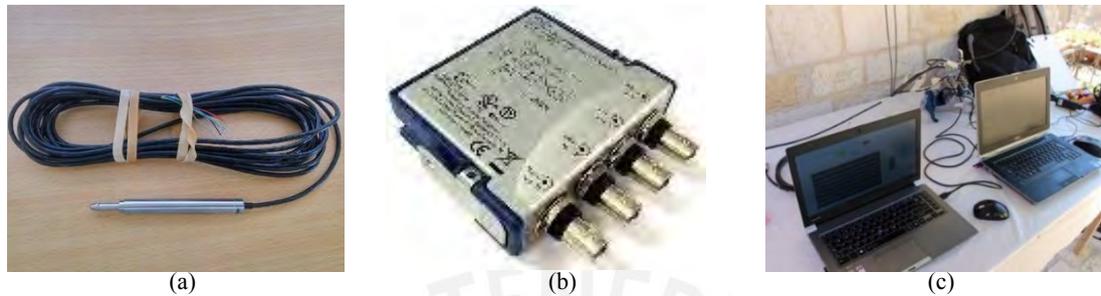


Figura 1.3. Monitoreo de desplazamientos mediante LVDTs. (a) Transductor de desplazamiento (LVDT), (b) Dispositivo de adquisición y (c) Procesamiento de datos.

Soportes para LVDTs

Para la instrumentación de los LVDTs en las campañas experimentales fue necesario que se diseñaran distintos modelos de soporte para LVDTs, los cuales fueron impresos utilizando impresoras 3D en la sala VEO 3D. El material utilizado fue ABS el cual tiene una densidad seis veces menor al acero. Esto facilita la instrumentación de los LVDTs, pues se asegura una correcta fijación de los puntos de referencia a la superficie de los adobes.

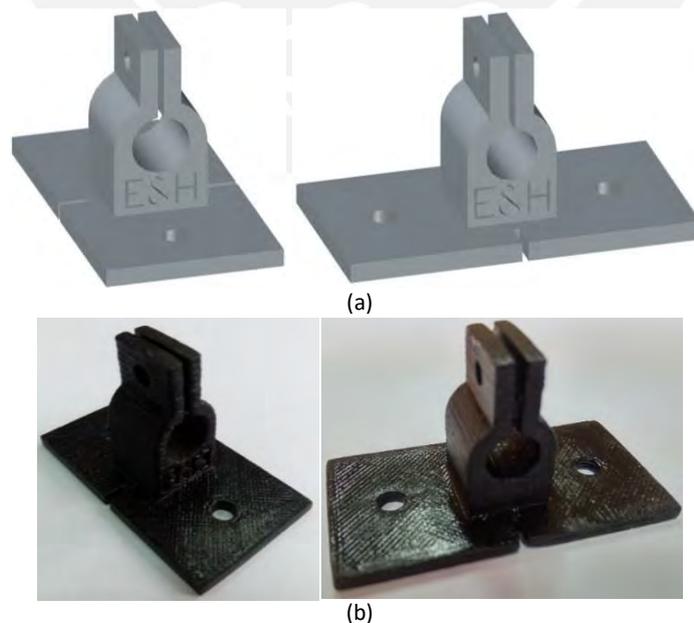


Figura 1.4. Soportes para LVDTs (a) Modelos generados en formato .stl y (b) Modelos impresos en material ABS por la sala VEO 3D.

Correlación digital de imágenes (DIC)

Se utilizó una técnica de medida de deformación óptica no intrusiva en 3D basada en la correlación digital de imágenes (DIC) implementado en el sistema ARAMIS 5M. Con una precisión de 1 μm . El equipamiento consta de dos cámaras (izquierda y derecha), un trípode y un equipo de adquisición para el procesamiento de imágenes. Para realizar el control de desplazamientos mediante este método es necesario establecer un patrón de puntos en el área de ensayo. Este patrón se logra pintando la superficie de blanco mate y esparcir aleatoriamente puntos negros utilizando un spray negro mate.



Figura 1.5. Monitoreo de desplazamientos mediante DIC (a) Equipo de cámaras para la toma de datos, (b) Área de ensayo monitoreada por el DIC y (c) Procesamiento de datos con ambas cámaras (izquierda y derecha).

1.4. Objetivos

Esta investigación tiene como objetivo general conocer las propiedades mecánicas de la mampostería que compone el sistema estructural de una construcción de adobe mediante el uso del ensayo de flat jack. Este ensayo será calibrado previamente en una campaña experimental en laboratorio llevada a cabo sobre muros de mampostería.

Como objetivos específicos se tienen los siguientes:

- Conocer las propiedades mecánicas de muros de mampostería mediante el ensayo de flat jack, para el cual se utilizan dos métodos de monitoreo de deformaciones (LVDTs y DIC) los cuales serán comparados entre sí.
- Conocer las propiedades mecánicas de prismas de mampostería mediante el ensayo de compresión simple uniaxial y comparar con los resultados obtenidos con el ensayo de flat jack en muros de mampostería. Luego, obtener la validación del ensayo mediante el modelamiento numérico y comparar los resultados con los obtenidos experimentalmente.
- Conocer las propiedades mecánicas de la mampostería que compone una construcción de adobe, el caso de estudio es la iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca.
- Proponer una metodología de aplicación del ensayo de flat jack en construcciones de adobe.

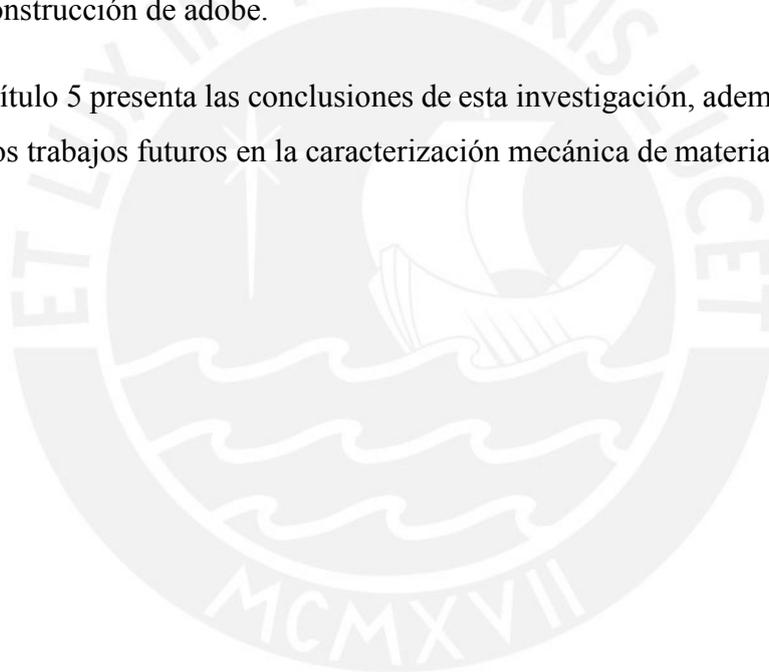
1.5. Organización

La presente tesis de investigación contiene 4 capítulos, a continuación se muestra el contenido de cada capítulo:

- El capítulo 1 es la introducción, donde se presenta la motivación para desarrollar esta investigación, los objetivos y la organización de la tesis resumiendo brevemente el contenido de cada capítulo.
- El capítulo 2 presenta la campaña experimental de caracterización mecánica de muros de mampostería de adobe y ladrillo mediante el ensayo de flat jack. Para el monitoreo de deformaciones se utilizaron transductores de desplazamiento (LVDT) y una técnica de medida de la deformación no intrusiva óptica en 3D. Esta técnica está basada en la correlación digital de imágenes (DIC) implementado en el sistema ARAMIS 5M. Estos resultados son comparados con Las propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de compresión simple en prismas de mampostería. Finalmente, se desarrolla el modelamiento numérico

del ensayo de flat jack en los muros de mampostería y los resultados son comparados con los obtenidos experimentalmente.

- El capítulo 3 presenta la campaña experimental de caracterización mecánica de la mampostería de la iglesia virgen de la Asunción de Sacsamarca mediante el ensayo de flat jack. El ensayo fue aplicado en dos fachadas de la iglesia y se determinan el estado de tensiones, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de la mampostería de cada fachada.
- El capítulo 4 presenta las lecciones aprendidas en las campañas experimentales en laboratorio y en el caso de estudio, además se presenta la metodología de aplicación del ensayo de flat jack para determinar las propiedades mecánicas de una construcción de adobe.
- El capítulo 5 presenta las conclusiones de esta investigación, además se proponen algunos trabajos futuros en la caracterización mecánica de materiales.



CAPÍTULO 2. ENSAYO DE FLAT JACK PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE Y LADRILLO ARTESANAL EN LABORATORIO

Resumen. Este capítulo discute los resultados de una campaña experimental utilizando la técnica de flat jack en un muro de mampostería de adobe y un muro de mampostería de ladrillo artesanal para determinar sus principales propiedades mecánicas, como el estado de tensión y el módulo de elasticidad. Además, mediante ensayos de compresión uniaxial en tres prismas de cada material, se obtuvieron los módulos de elasticidad del adobe y ladrillo artesanal. El ensayo de flat jack simple estima el nivel de tensión local en los muros a través del monitoreo continuo del estado de deformaciones, mientras que el ensayo de flat jack doble determina la gráfica de esfuerzo - deformación generado por la presión aplicada en dos flat jacks paralelos. En este trabajo se utilizaron la correlación digital de imágenes (DIC) junto con los LVDTs para monitorear el estado de las deformaciones de cada muro durante los ensayos de flat jack. El DIC demostró ser una buena herramienta debido a su capacidad para medir los desplazamientos de cualquier punto que se encuentre dentro del área de visión de las cámaras. Los resultados obtenidos muestran que las deformaciones son mayores en el centro del área de ensayo en comparación a las deformaciones en los extremos del área de ensayo. Esto es debido a la influencia de la mampostería que se encuentra alrededor del área de ensayo. Además, el ensayo de flat jack sobreestima el módulo de elasticidad en comparación al ensayo de compresión uniaxial llevada a cabo en prismas.

2.1. Introducción

El diagnóstico de estructuras existentes requiere herramientas no destructivas o semi destructivas para su evaluación. En caso de las técnicas semi destructivas, el daño generado en la estructura debe ser temporal y fácilmente reparable, lo cual supone un desafío importante debido a las condiciones de campo bajo las cuales se encuentra la estructura evaluada [4]. Esta dificultad se debe a la variabilidad de las propiedades de los materiales tradicionales, la complejidad de la geometría de la estructura, las diferentes técnicas de construcción que se utilizan, la falta de conocimiento sobre el daño existente y cómo ciertas acciones podrían afectar el comportamiento mecánico de las construcciones [13]. Una gran cantidad de estudios e intervenciones han contribuido directa o indirectamente a la generación de información sobre los materiales que constituyen estas estructuras y su proceso de construcción. En particular, se han desarrollado técnicas de diagnóstico no destructivas para determinar el estado real de una estructura de alto valor arquitectónico y cultural sin afectar su integridad [1] [14] [15].

En primer lugar, se presentan las propiedades mecánicas obtenidas mediante los ensayos de compresión llevadas a cabo en los prismas de mampostería. Luego, se presenta la aplicación del ensayo de flat jack en un muro de mampostería de adobe y un muro de mampostería de ladrillo artesanal para determinar el estado de tensión y el módulo de elasticidad en cada caso. En los ensayos, se utilizaron diferentes métodos de medición de desplazamiento que incluyen mediciones ópticas basadas en la correlación digital de imágenes – DIC [6] y transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT). Los resultados de los ensayos de flat jack utilizando ambos métodos son comparados y discutidos. Finalmente, estos resultados se compararon con las propiedades mecánicas obtenidas por los ensayos de compresión uniaxial llevadas a cabo en tres prismas de adobe y tres de mampostería artesanal.

2.2. Ensayo de compresión para determinar las propiedades mecánicas de prismas de mampostería de adobe y ladrillo artesanal

El ensayo de compresión se llevó a cabo en tres prismas de mampostería de adobe y tres prismas de mampostería de ladrillo artesanal. Como se muestra en la Figura 2.1, los prismas de adobe tienen cinco hileras de unidades de mampostería y los prismas de ladrillos artesanales tienen seis hileras de unidades de mampostería. El objetivo es obtener

una esbeltez de $h / b = 5$ en cada prisma como se recomienda en in [16] y [17]. Se utilizaron LVDTs para la medición de desplazamientos durante los ensayos y la longitud monitoreada en los prismas fue de 32 cm.



Figura 2.1. Ensayo de compresión en (a) prismas de adobe y (b) prismas de ladrillo artesanal.

El módulo de elasticidad se determinó de acuerdo al ASTM-C1314 mediante el método de módulo de elasticidad de la cuerda usando los puntos extremos de 0,05 y 0,33 del esfuerzo de compresión máximo de cada prisma [18]. La Figura 2.2a y Figura 2.2b muestran las curvas de esfuerzo – deformación del adobe y del ladrillo artesanal con un promedio de esfuerzo de compresión máxima de 1.3 ± 0.2 MPa para prismas de adobe y 2.6 ± 0.5 MPa para prismas de ladrillo artesanal.

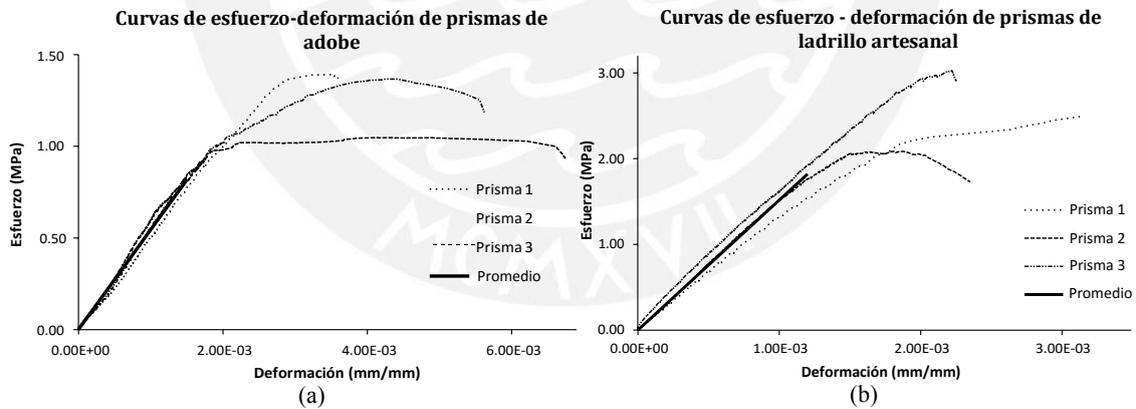


Figura 2.2. Curvas de esfuerzo – deformación de (a) prismas de adobe y (b) prismas de ladrillo artesanal.

Tabla 2.1. Módulos de elasticidad de los prismas de adobe y ladrillo artesanal obtenidos mediante el ensayo de compresión.

Prisma	Módulo of Elasticidad (MPa)	
	Adobe	Ladrillo artesanal
1	500.4	1362.1
2	564.4	1564.1
3	568.5	1624.3
Promedio	544.4	1516.8
Desviación estándar	38.2	137.3

Como se muestra en la Tabla 2.1, el módulo de elasticidad obtenido en los prismas de adobe fue de 544 ± 38 MPa, y en los prismas de ladrillo artesanal fue de 1517 ± 137 MPa.

2.3. Aplicación del ensayo de flat Jack en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal

2.3.1. Metodología

El ensayo de flat Jack es considerado una técnica semi destructiva para determinar las propiedades mecánicas de las construcciones de mampostería existentes, como son el estado de tensión y el módulo de elasticidad [19]. La técnica del flat jack fue adaptada por el investigador italiano Paolo Rossi (Istituto Sperimentale Modelli e Strutture) a principios de la década de 1980 [5]. La primera aplicación in situ del ensayo de flat jack en construcciones patrimoniales fue en las paredes de ladrillo del Palazzo della Ragione en Milán [6]. En investigaciones recientes, el ensayo de flat jack fue utilizado por [7] como parte de un análisis de fallas y diseño de reforzamiento de puentes históricos de mampostería y [8] presenta una metodología del ensayo de flat jack in-situ utilizando varios métodos de medición de desplazamiento. Ambos autores concluyen que los ensayos de flat jack in-situ son más eficientes que los ensayos de compresión en laboratorio. El ensayo se divide en dos etapas, los ensayos de flat jack simple y doble, que se describen a continuación.

El ensayo de flat Jack simple se basa en el principio de liberación de tensiones debido al corte de una hendidura en la junta de mortero de la mampostería. La liberación de tensiones en ese punto produce un acercamiento entre la mampostería ubicada sobre y debajo de la hendidura. El estado de tensión en la mampostería se puede medir insertando un dispositivo de flat jack en la hendidura y aumentando su presión interna utilizando una bomba hidráulica. La presión debe aumentarse hasta que se restablezca la distancia original (medida antes de hacer la ranura) entre los puntos de referencia por encima y por debajo de la hendidura [11].

El ensayo de flat Jack doble permite determinar las curvas de esfuerzo – deformación local de la mampostería existente insertando dos dispositivos flat jack en hendiduras paralelas (una encima de la otra) en un muro de mampostería. Un esfuerzo de compresión es aplicado a la mampostería comprendida entre los flat jacks mediante un aumento gradual de la presión interna en los mismos. El módulo de elasticidad de la mampostería

se puede obtener midiendo las deformaciones verticales en los puntos de referencia colocados en la mampostería comprendida entre los flat jacks [12].

Los dispositivos flat jack tienen rigidez inherente que se opone a su expansión durante el ensayo. Por lo tanto, la presión suministrada en los flat jacks debe corregirse por un factor K_m que resulta de una calibración de fábrica. Además, el factor K_a debe ser considerado en la corrección de la presión, este factor es la relación entre el área del flat jack y el área de la hendidura. Finalmente, la presión efectiva se calculó como se muestra en la ecuación 1. Estos factores de corrección influyen directamente en el cálculo del estado de tensión (ensayo de flat jack simple) y el módulo de elasticidad (ensayo de flat jack doble) de la mampostería [12].

$$f_m = K_m K_a P \quad (1)$$

Donde f_m es la presión efectiva en MPa y P es la presión suministrada a los dispositivos flat jack en MPa. En esta investigación, se utilizaron flat jacks rectangulares de 40 cm x 20 cm y 6 mm de espesor (suministrados y calibrados por DRC s.r.l., Italia) con un factor de calibración $K_m = 0,86$. Para calcular K_a es necesario determinar el área de la hendidura, en esta campaña experimental las hendiduras tenían 2 cm de exceso con respecto a los flat jacks en cada caso. Las dimensiones de las hendiduras en los ensayos fue de 42 cm x 22 cm, por lo que se obtuvo el factor $K_a = 0,866$.

2.3.2. Descripción de los muros de mampostería y configuración inicial del ensayo

El ensayo de flat jack se llevó a cabo en dos muros de mampostería, el primero es un muro de adobe con juntas de barro y el segundo, un muro de ladrillo artesanal con juntas de mortero de cemento. La sección transversal del muro de adobe es de 1.50 m x 0.22 m y una altura de 1.95 m (Figura 2.3a), mientras que la sección transversal del muro de ladrillo artesanal es de 1.50 m x 0.22 m y una altura de 2.05 m (Figura 2.3c). Con el objetivo de obtener una presión inicial significativa, se utilizó una celda de carga para aplicar una peso sobre los muros de mampostería. El muro de mampostería de adobe se cargó progresivamente (Figura 2.3b) hasta 100 kN. El muro de mampostería de ladrillo artesanal se cargó progresivamente (Figura 2.3d) hasta 150 kN.

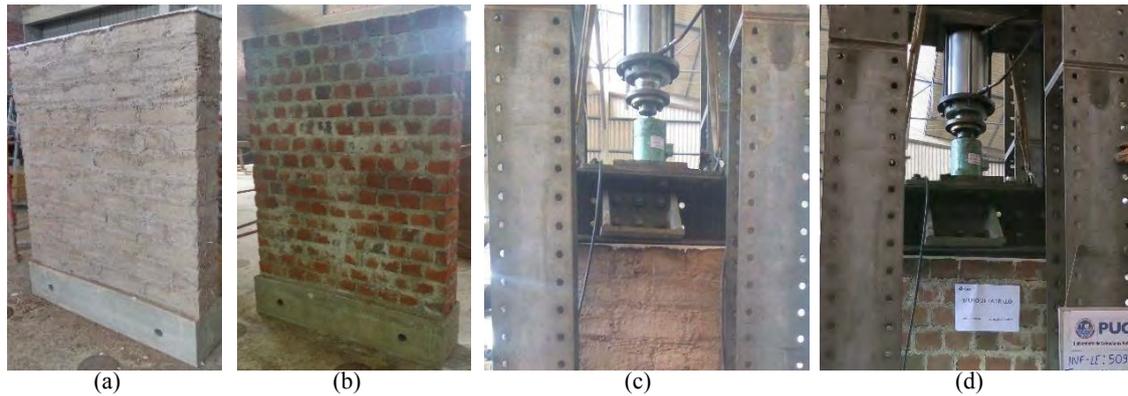


Figura 2.3. Precarga de los muros de mampostería para los ensayos de flat jack. a) Muro de mampostería de adobe, b) muro de mampostería de ladrillo, c) aplicación de carga sobre el muro de mampostería de adobe, and d) aplicación de carga sobre el muro de mampostería de ladrillo artesanal.

2.3.3. Procedimiento del ensayo de flat jack simple

Como se muestra en la Figura 2.4, los puntos de referencia verticales para los LVDT fueron adheridos al área de prueba (30 cm x 20 cm) antes de realizar la hendidura. Para el monitoreo de desplazamientos verticales usando DIC, se requiere cubrir la superficie de la muestra con pintura blanca y puntos negros aleatorios. Después de medir la longitud entre los puntos de referencia, la hendidura se realizó usando un taladro. Finalmente, el dispositivo flat Jack fue insertado en la hendidura y el ensayo queda instrumentado. La Figura 2.4a muestra la representación esquemática del ensayo de flat Jack simple, mientras que la Figura 2.4b muestra la distribución de los puntos de referencia verticales (V1, V2, V3 y V4) en la campaña experimental. Utilizando un flat jack, se suministra presión al dispositivo y se registran las deformaciones en los puntos de referencia. Como se muestra en la Figura 2.4c, el área de ensayo para monitorear desplazamientos usando DIC es una ventana de 25 cm x 18 cm, que también se indica en la Figura 2.4a.

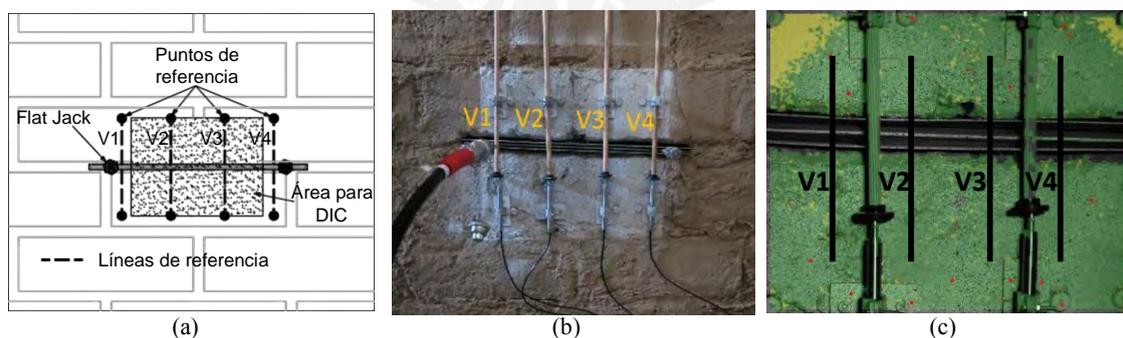


Figura 2.4. Ensayo de flat jack simple para determinar el estado de tensiones en un área del muro de mampostería: (a) representación esquemática, (b) distribución de LVDTs y (c) área para monitoreo de desplazamiento usando DIC.

2.3.4. Procedimiento del ensayo de flat jack doble

Con el objetivo de aislar una porción de muro de mampostería, se perforó una nueva hendidura paralela sobre la primera hendidura. Después de insertar el segundo dispositivo flat jack (Figura 2.5a), se colocan los puntos de referencia verticales en la porción de mampostería entre ambos flat jacks para monitorear los desplazamientos verticales utilizando los LVDTs. Además, para monitorear los desplazamientos usando DIC, se requiere cubrir la superficie de la muestra con pintura blanca y puntos negros aleatorios, ver Figura 2.5b. Finalmente, los LVDTs verticales están instrumentados, ver Figura 2.5c.

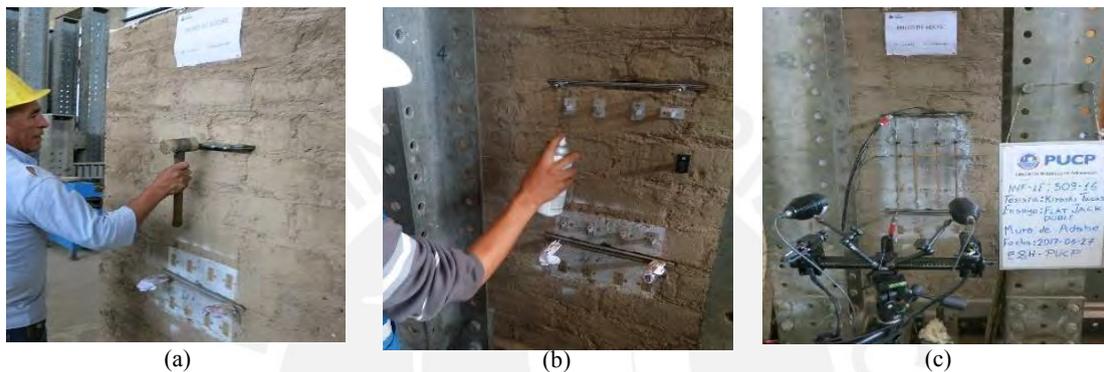


Figura 2.5. Instrumentación del ensayo de flat jack doble: (a) Perforado de la hendidura para la inserción del segundo flat jack, (b) pintado de la superficie y ubicación de los puntos de referencia y (c) ensayo de flat Jack doble instrumentado con LVDTs y DIC.

La Figura 2.6a muestra la representación esquemática del ensayo de flat jack doble, mientras que la Figura 2.6b muestra la distribución de los puntos de referencia verticales (V1, V2, V3 y V4) en la campaña experimental. Utilizando una bomba hidráulica, se suministra presión a ambos flat jacks y se registran los desplazamientos en los puntos de referencia. Como se muestra en la Figura 2.6c, el área de ensayo para monitorear desplazamientos usando DIC es una ventana de 25 cm x 18 cm.

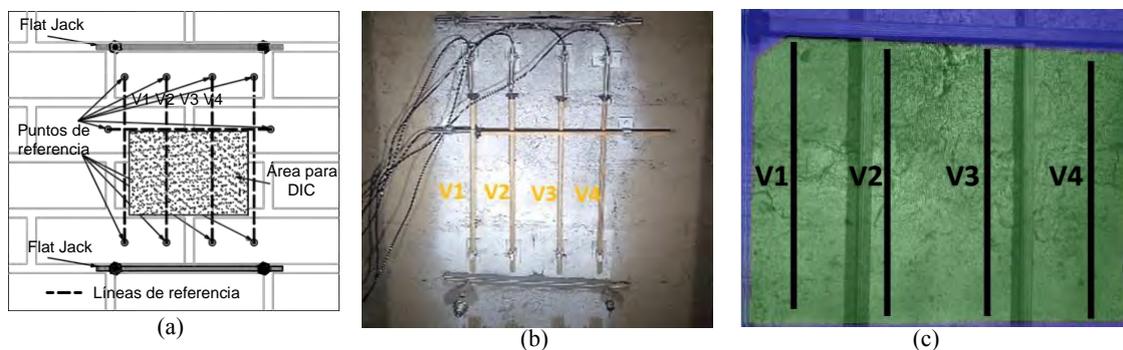


Figura 2.6. Ensayo de flat jack doble para determinar las curvas esfuerzo – deformación de la mampostería: (a) Representación esquemática, (b) distribución de los LVDTs y (c) área para el monitoreo de desplazamientos usando DIC.

2.4. Resultados y discusión

2.4.1. Ensayo de flat jack simple

La Tabla 2.2 muestra la longitud vertical inicial (V) entre cada punto de referencia, antes de realizar la hendidura en los ensayos de flat jack simple. Estas longitudes disminuyen después de realizada la hendidura y se recuperan gradualmente hasta los valores iniciales. En el caso del muro de mampostería de ladrillo artesanal, se tomaron tres puntos de referencia para monitorear los desplazamientos utilizando DIC.

Tabla 2.2. Longitud inicial entre puntos de referencia en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal para los ensayos de flat jack simple.

Punto de referencia	Longitud (mm)			
	Adobe		Ladrillo artesanal	
	LVDTs	DIC	LVDTs	DIC
V1	180	129	180	159
V2	180	129	180	159
V3	180	129	180	161
V4	180	128	180	

La Figura 2.7a y la Figura 2.7b muestran la evolución de la deformación en los puntos de referencia del muro de mampostería de adobe medida utilizando LVDT y DIC, respectivamente. La deformación de los puntos de referencia ubicados en los extremos del área de ensayo del muro de adobe presenta una variación menor en comparación con el resto de los puntos de referencia. Probablemente, esto se debe a la interacción de la mampostería que rodea el área de ensayo, la cual proporciona rigidez adicional a los extremos del área de ensayo. La Figura 2.8a y la Figura 2.8b muestran el estado de las tensiones en el muro de mampostería de adobe utilizando LVDTs y DIC respectivamente, obtenida mediante la intersección del gráfico con la abscisa en cada caso.

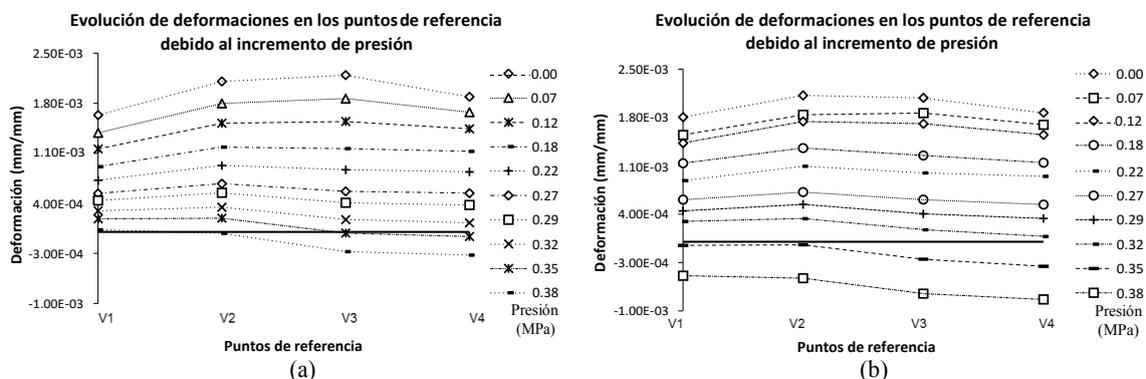


Figura 2.7. Diagrama de la evolución de deformaciones en el ensayo de flat jack simple en el muro de mampostería de adobe utilizando a) LVDTs, y b) DIC.

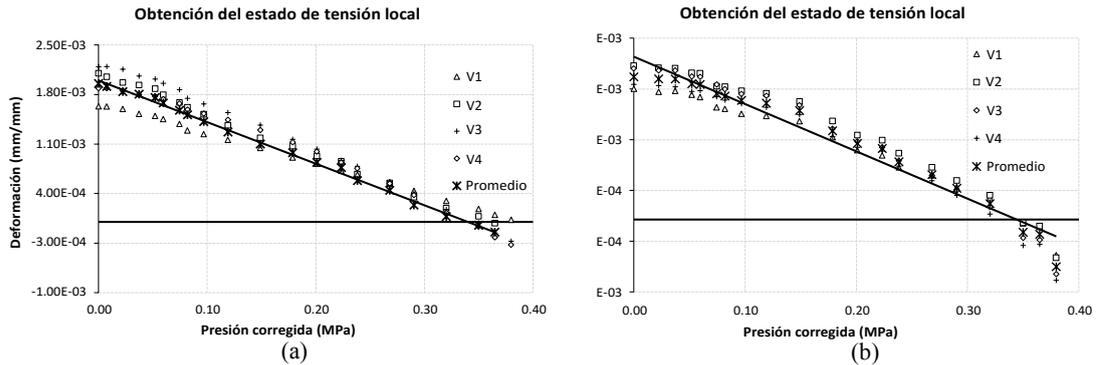


Figura 2.8. Diagrama de la obtención del estado de tensión local en el ensayo de flat jack simple llevada a cabo en el muro de mampostería de adobe utilizando a) LVDTs, y b) DIC.

La Figura 2.9a y la Figura 2.9b muestran la evolución de la deformación en los puntos de referencia del muro de mampostería de ladrillo artesanal utilizando LVDTs y DIC, respectivamente. La deformación de los puntos de referencia ubicados en los extremos del área de ensayo del muro de adobe presenta una variación menor en comparación con el resto de los puntos de referencia. Probablemente, esto se debe a la interacción de la mampostería que rodea el área de ensayo, que proporciona rigidez adicional a los extremos del área de ensayo.

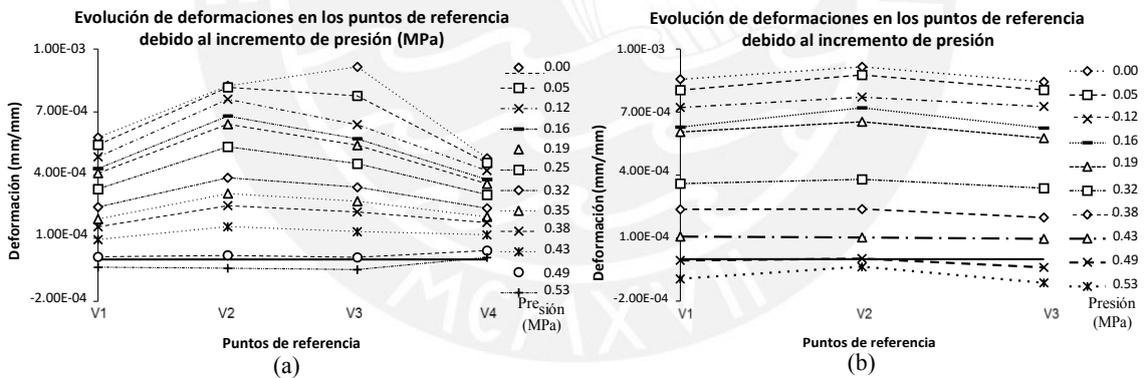


Figura 2.9. Diagrama de la evolución de deformaciones en el ensayo de flat jack simple en el muro de ladrillo artesanal utilizando a) LVDTs, y b) DIC.

La Figura 2.10a y la Figura 2.10b muestran el estado de las tensiones para el muro de mampostería de ladrillo artesanal obtenido por la intersección del gráfico con la abscisa usando LVDT y DIC respectivamente, obtenida mediante la intersección del gráfico con la abscisa en cada caso.

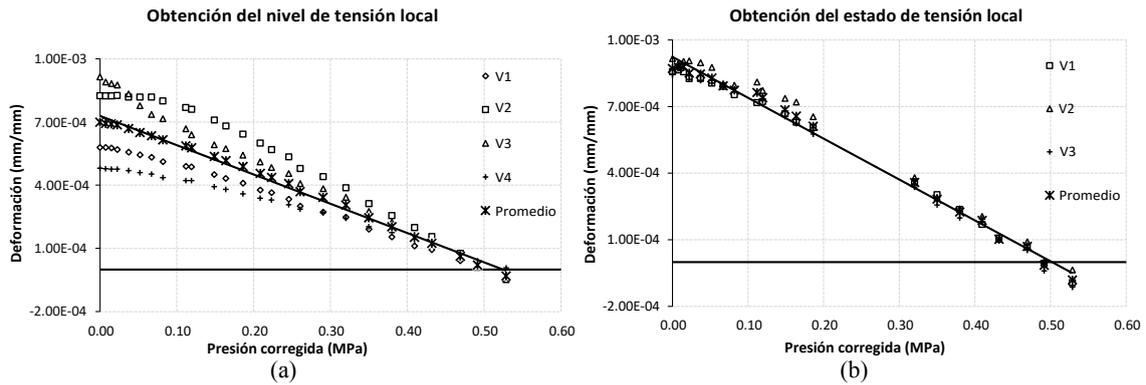


Figura 2.10. Diagrama de la obtención del estado de tensión local en el ensayo de flat jack simple llevada a cabo en el muro de mampostería de ladrillo artesanal utilizando a) LVDTs, y b) DIC.

En los ensayos de flat jack simple realizados en ambos muros de mampostería, la presión aplicada en los flat jacks fue incrementada progresivamente hasta obtener una presión corregida de 0,38 MPa en el muro de mampostería de adobe y 0,53 MPa en el muro de mampostería de ladrillo artesanal. Con estos valores, la longitud inicial entre la mayoría de los puntos de referencia ya se ha recuperado en ambos casos.

La Tabla 2.3 muestra que el promedio del estado de tensión en el muro de mampostería de adobe es de 0.37 ± 0.02 MPa utilizando LVDTs, y 0.35 ± 0.02 MPa utilizando DIC. Además, el promedio del estado de tensión en el muro de mampostería de ladrillo artesanal es 0.53 ± 0.03 MPa utilizando LVDTs, y 0.50 ± 0.01 MPa utilizando DIC.

Adicionalmente, el estado de tensión real en el muro de mampostería de adobe fue de 0.32 MPa considerando una precarga de 100 kN aplicada sobre el muro y el peso de muro sobre el punto de prueba. Por lo tanto, los resultados obtenidos mediante el ensayo sobreestiman el estado de tensión real en 15% y 9% utilizando LVDTs y DIC, respectivamente. En el caso del muro de mampostería de ladrillo artesanal, el estado de tensión real fue de 0.48 MPa, considerando una precarga de 150 kN aplicada sobre el muro y el peso de muro sobre el punto de prueba. Por lo tanto, los resultados obtenidos mediante el ensayo sobreestiman el estado de tensión real en 10% y 4% utilizando LVDTs y DIC, respectivamente.

Tabla 2.3. Estado de tensión obtenido en muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal mediante los ensayos de flat jack simple.

Punto de referencia	Estado de tensión (MPa)			
	Adobe		Ladrillo artesanal	
	LVDTs	DIC	LVDTs	DIC
V1	0.39	0.36	0.51	0.50
V2	0.38	0.36	0.53	0.51
V3	0.35	0.34	0.50	0.49
V4	0.35	0.33	0.57	
Promedio	0.37	0.35	0.53	0.50
Desviación estándar	0.02	0.02	0.03	0.01
Estado de tensión real	0.32	0.32	0.48	0.48
Error	15 %	9 %	10 %	4 %

2.4.2. Ensayo de flat jack doble

La Tabla 2.4 muestra la longitud vertical (V) inicial entre cada punto de referencia después de realizar las hendiduras para los ensayos de flat jack doble. Se debe tener en cuenta que el punto de referencia V2 en el muro de mampostería de adobe fue descartado debido al desprendimiento del LVDT en ese punto de referencia durante el ensayo.

Tabla 2.4. Longitud inicial entre puntos de referencia en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal para el ensayo de flat jack doble.

Punto de referencia	Longitud (mm)			
	Adobe		Ladrillo artesanal	
	LVDTs	DIC	LVDTs	DIC
V1	320	134	340	169
V2	320	140	DESCARTADO	170
V3	320	140	340	170
V4	320	134	340	169

La Figura 2.11 y la Figura 2.12 muestran la evolución de la deformación en los puntos de referencia debido al aumento de la presión en los flat jacks obteniendo el módulo de elasticidad de ambos muros. La Figura 2.11a y la Figura 2.12a muestran la evolución de la deformación en los puntos de referencia obtenidos utilizando LVDTs y, la Figura 2.11b y la Figura 2.12b muestran la evolución de la deformación en los puntos de referencia obtenidos utilizando DIC en ambos muros.

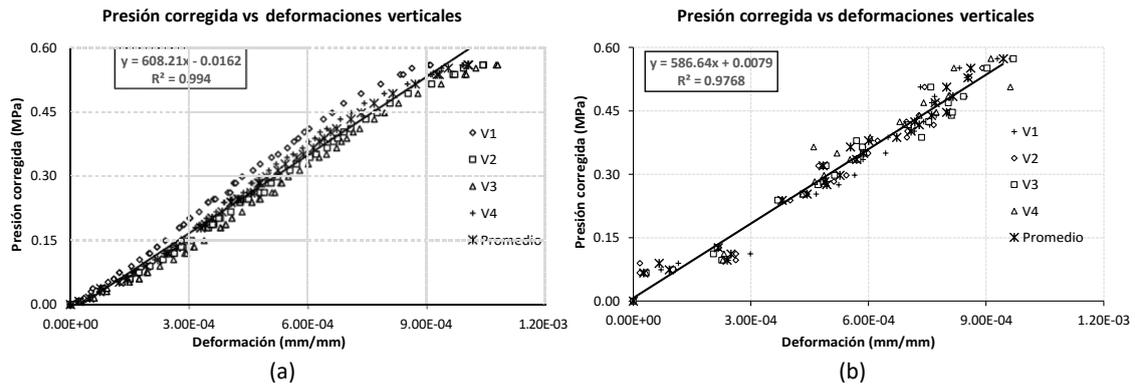


Figura 2.11. Diagrama de monitoreo de esfuerzo – deformación en el ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de adobe. Utilizando a) LVDTs y b) DIC.

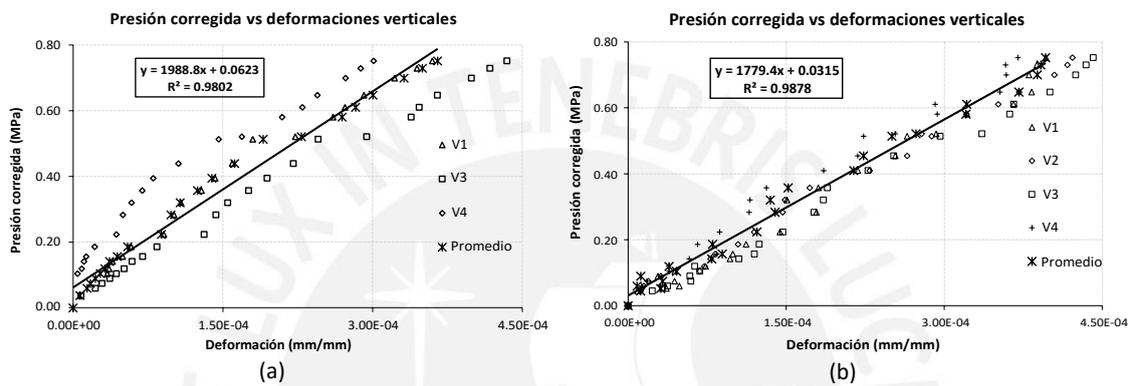


Figura 2.12. Diagrama de esfuerzo – deformación en el ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de ladrillo artesanal. Utilizando a) LVDTs y b) DIC.

Se aplicó una estimación de tendencia lineal al promedio de deformaciones vertical y a la presión corregida para determinar el módulo de elasticidad en cada caso. Obteniendo coeficientes de determinación (R^2) que varían entre 0.98 y 0.99, estas tendencias lineales muestran que las pruebas se realizaron en el rango elástico de la mampostería.

La Tabla 2.5 muestra que el módulo de elasticidad obtenido mediante los ensayos de flat jack doble aplicado en el muro de mampostería de adobe fue de 610 ± 38 MPa utilizando LVDTs, y 583 ± 12 MPa utilizando DIC. Además, el módulo de elasticidad de la mampostería de ladrillo artesanal fue 1904 ± 189 MPa utilizando LVDTs y 1732 ± 99 MPa utilizando DIC. La diferencia en los resultados utilizando ambos métodos para las mediciones de desplazamiento son similares a las diferencias obtenidas por [8], donde obtiene diferencias menores al 7 %.

Tabla 2.5. Módulo de elasticidad obtenido mediante el ensayo de flat jack doble en los muros de mampostería de adobe y ladrillo artesanal.

Punto de referencia	Módulo de elasticidad (MPa)			
	Adobe		Ladrillo artesanal	
	LVDTs	DIC	LVDTs	DIC
V1	658.2	595.7	1962.4	1807.0
V2	583.6	573.9	DESCARTADO	1707.5
V3	576.1	570.9	1692.3	1681.5
V4	620.6	591.0	2056.7	1898.4
Promedio	609.7	582.9	1903.8	1732.0
Desviación estándar	37.8	12.3	189.1	99.2

2.5. Modelamiento numérico

Con el objetivo de llevar a cabo una validación del ensayo de flat jack, se desarrolló un Modelo de Elementos Finitos (MEF) utilizando el software DIANA TNO [20]. El desarrollo del MEF incluye la geometría del muro de mampostería de adobe presentada anteriormente, la definición de las condiciones de contorno y la generación de la malla de EF y la aplicación de cargas (Figura 2.13a).

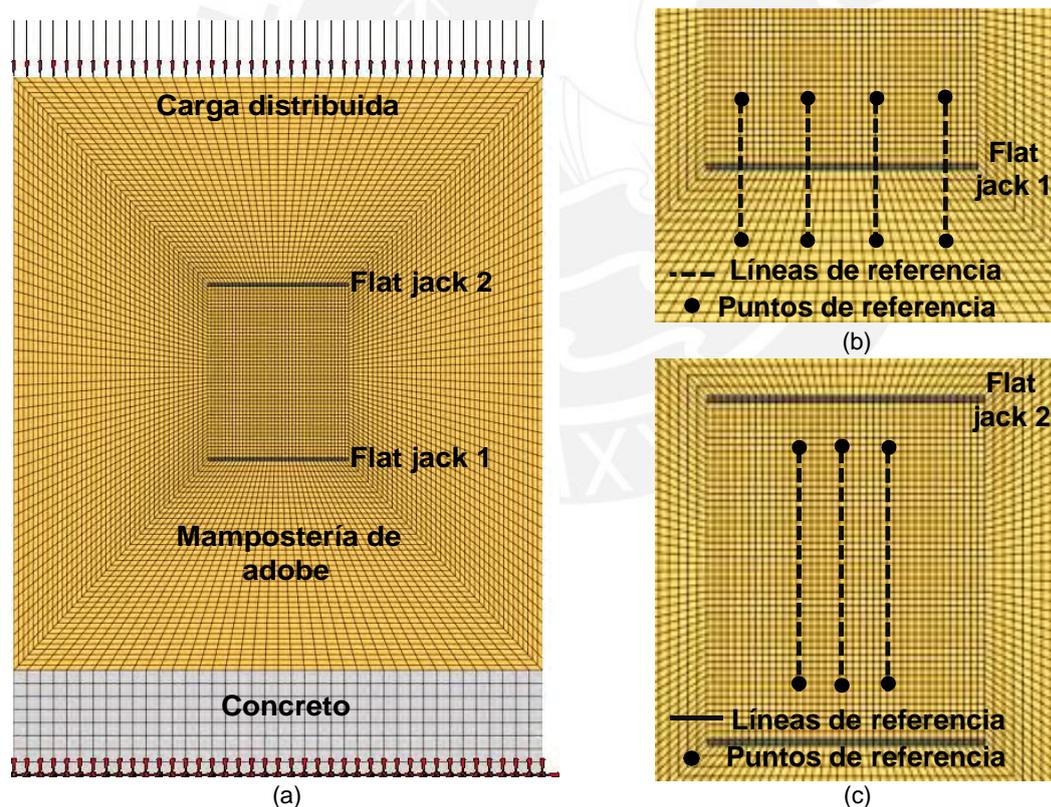


Figura 2.13. Implementación de la malla de EF del ensayo de flat jack: (a) Ubicación de los flat jacks, (b) distribución de puntos de referencia en el ensayo de flat jack simple, y (c) distribución de puntos de referencia en el ensayo de flat jack doble.

El MEF muestra, mediante un análisis por fases, una representación de los ensayos de flat jack simple y doble llevados a cabo en el muro de mampostería de adobe. Las propiedades

elásticas de entrada se obtuvieron a partir del ensayo de compresión en prismas de adobe que fueron presentados anteriormente. La Figura 2.13b y la Figura 2.13c muestran la distribución de los puntos de referencia en el ensayo de flat jack simple y doble, respectivamente.

2.5.1. Ensayo de flat jack simple

La Figura 2.14a muestra los desplazamientos verticales iniciales (en metros) del muro de mampostería de adobe después de haber sido aplicada una carga distribuida de 100 kN sobre el muro. Después, se realizó la hendidura para el ensayo de flat jack simple produciendo un acercamiento entre la mampostería localizada sobre y bajo la hendidura (Figura 2.14b).

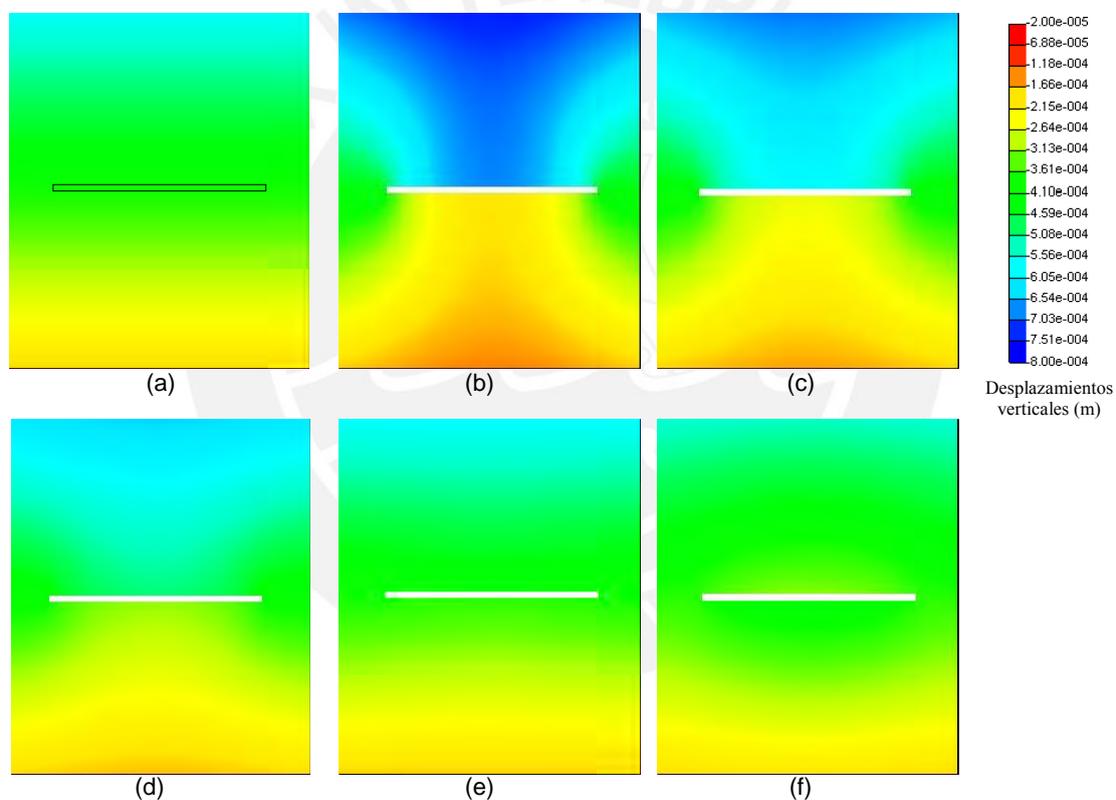


Figura 2.14. Desplazamientos verticales (m) de los nodos en el modelamiento numérico del ensayo de flat jack simple en la mampostería de adobe. (a) Desplazamientos verticales iniciales, (b) desplazamientos después de la realización de la hendidura, y desplazamientos debidos a una presión suministrada en la ranura de (c) 0.1 MPa, (d) 0.2 MPa, (e) 0.3 MPa y (f) 0.4 MPa.

Finalmente, los desplazamientos verticales iniciales se restauran aumentando gradualmente la presión en la hendidura (simulando la transmisión de presiones por el flat jack) mediante fases de carga. Los desplazamientos de las fases de carga correspondientes a 0.1 MPa, 0.2 MPa, 0.3 MPa y 0.4 MPa se presentan en las Figura

2.14c, 2.14d, 2.14e y 2.14f, respectivamente. Los desplazamientos correspondientes a 0.3 MPa están cerca de los desplazamientos iniciales. Sin embargo, los desplazamientos correspondientes a 0,4 MPa muestran el inicio de una separación entre la mampostería por encima y por debajo de la hendidura.

La Figura 2.15 muestra la evolución de la deformación en los puntos de referencia debido al aumento gradual de presión en la hendidura. Según la Figura 2.15a, la deformación en los puntos de referencia V1 y V4 presenta una variación menor en comparación con el resto de los puntos de referencia. Esto se debe a la interacción de la mampostería que rodea el área de ensayo, la cual proporciona rigidez adicional a la mampostería ensayada. La Figura 2.15b muestra el estado de tensión obtenido mediante la intersección del gráfico con la abscisa. Las presiones se presentan en MPa.

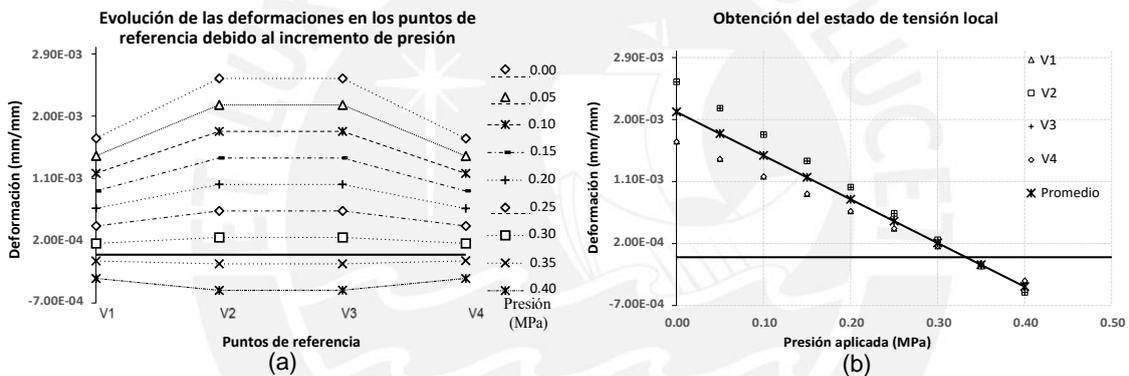


Figura 2.15. Diagrama de monitoreo de deformación del modelado numérico del ensayo de flat jack simple en el muro de mampostería de adobe a) Evolución de las deformaciones y b) Obtención del estado local de tensión.

La Tabla 2.6 muestra que el promedio del estado de tensión en el muro de mampostería fue de 0,33 MPa. Además, todos los puntos de referencia recuperan la deformación inicial a la misma presión, lo que significa que la interacción de la mampostería que rodea el área de ensayo no afecta la obtención del estado de tensión en el ensayo de flat jack simple.

Tabla 2.6. Estado de tensión obtenido mediante el modelamiento numérico del ensayo de flat jack simple.

Punto de referencia	Estado de tensión (MPa)
V1	0.33
V2	0.33
V3	0.33
V4	0.33
Promedio	0.33
Desviación estándar	0.00

2.5.2. Ensayo de flat jack doble

La Figura 2.16a muestra los esfuerzos de compresión en el muro antes de hacer ambas hendiduras. Estos esfuerzos se deben principalmente a la carga repartida sobre el muro de 100 kN (equivalente a una presión de 3×10^5 N/m² o 0.3 MPa). Posteriormente, en la Figura 2.16b se presentan los esfuerzos a compresión en el área de ensayo luego de realizar ambas hendiduras. Se puede apreciar que se liberan las tensiones sobre y bajo ambas hendiduras y una concentración de tensiones en ambos extremos de cada hendidura. Finalmente, la presión en ambas hendiduras es incrementada gradualmente mediante fases de carga para monitorear los desplazamientos verticales. Los esfuerzos de compresión en las fases de carga correspondientes a 0.1 MPa, 0.2 MPa, 0.3 MPa y 0.4 MPa de presión en las hendiduras se presentan en la Figura 2.16c, 2.16d, 2.16e y 2.16f, respectivamente. Notar que a medida que se incrementan la presión en ambas hendiduras, los esfuerzos de compresión en el área de ensayo tienden a recuperar el estado inicial de tensiones. Cuando la presión ejercida en las hendiduras es de 0.3 MPa (Figura 2.16e) el nivel de tensión inicial ha sido recuperado casi en su totalidad.

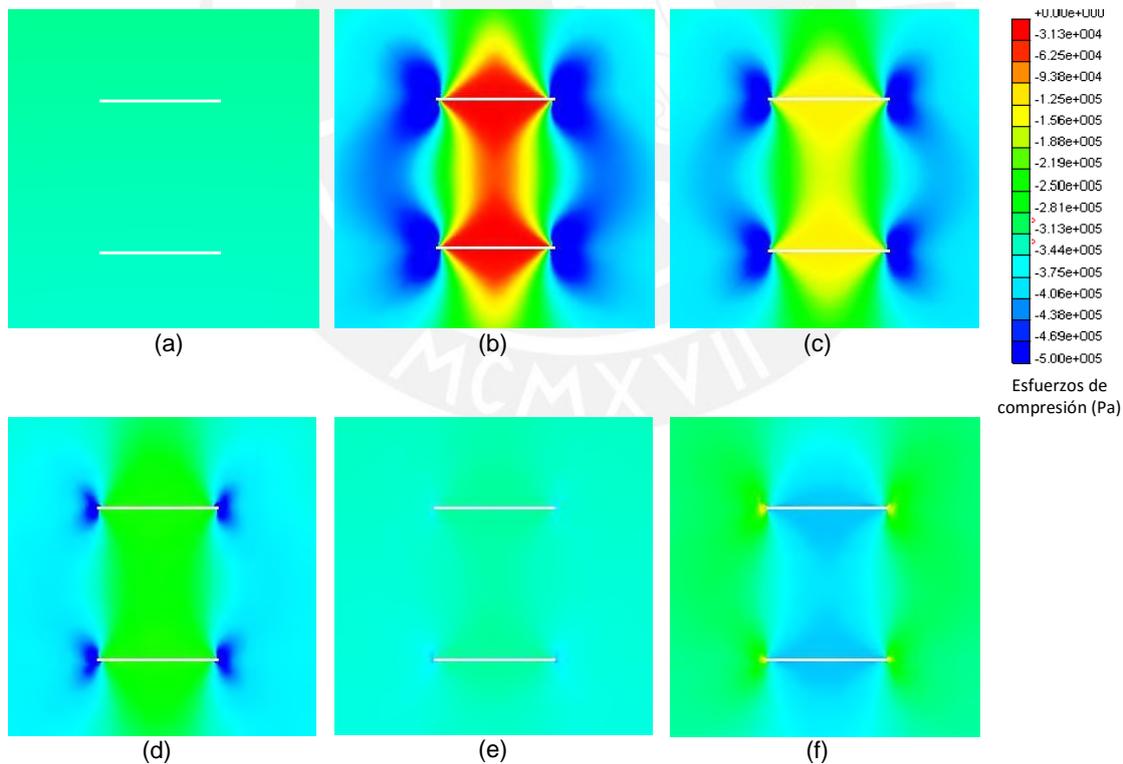


Figura 2.16. Esfuerzos de compresión (Pa) en el área de ensayo del modelamiento numérico del ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de adobe. (a) Esfuerzos de compresión debido a una carga de 100 kN sobre el muro, (b) esfuerzos de compresión después de realizarse ambas hendiduras y esfuerzos de compresión debido a una presión suministrada en ambas hendiduras de (c) 0.1 MPa, (d) 0.2 MPa, (e) 0.3 MPa y (f) 0.4 MPa.

Del modelamiento numérico del ensayo de flat jack doble, podemos concluir que las presiones suministradas en ambas hendiduras no se transmiten de manera homogénea y constante a la mampostería encerrada entre ambas hendiduras. Se observa que en los extremos del área del ensayo se transmite menor presión de la suministrada. Esto se debe a la interacción de la mampostería circundante al área del ensayo y que la asunción inicial de aislar la porción de mampostería mediante ambas hendiduras no se da por completo. Esto reafirma la sugerencia de colocar los puntos de referencia lo más cercano al centro del área de ensayo para obtener resultados más precisos.

La Figura 2.17 muestra la gráfica de esfuerzo – deformación en los puntos de referencia que permite obtener el módulo de elasticidad del muro de mampostería de adobe. Se aplicó una estimación de tendencia lineal al promedio de deformaciones vertical y a la presión aplicada. Esta tendencia lineal muestra que las pruebas se realizaron en el rango elástico de la mampostería.

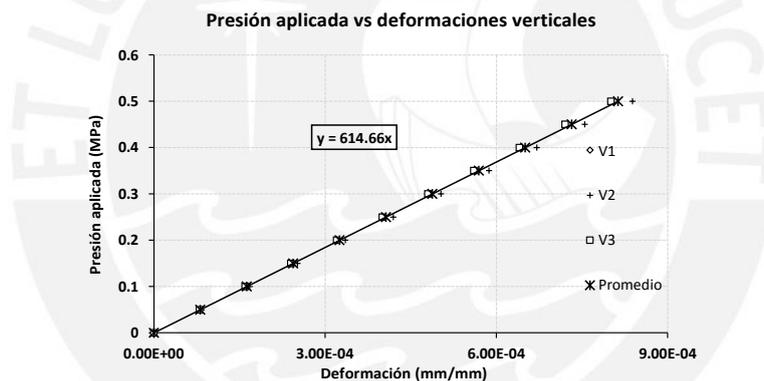


Figura 2.17. Diagrama del monitoreo de esfuerzo – deformación del modelamiento numérico del ensayo de flat jack doble en el muro de mampostería de adobe.

La Tabla 2.7 muestra que el módulo de elasticidad estimado a partir del modelado numérico del ensayo de flat jack doble aplicado en el muro de mampostería de adobe fue de 615 ± 16 MPa.

Tabla 2.7. Módulo de elasticidad obtenido mediante el modelamiento numérico del ensayo de flat jack doble.

Punto de referencia	Módulo de elasticidad (MPa)
V1	624.4
V2	596.1
V3	624.4
Promedio	615.0
Desviación estándar	16.3

2.6. Conclusiones

Los resultados del ensayo de flat jack simple realizado en el muro de mampostería de adobe muestran que los estados de tensión obtenidos utilizando LVDTs y DIC fueron 0,37 MPa con un CV de 6% y 0,35 MPa con un CV de 5%, respectivamente. El estado de tensión real fue de 0.32 MPa, considerando una precarga de 100 kN aplicada sobre el muro y el peso de muro sobre el punto de prueba. Por lo tanto, los resultados obtenidos mediante el ensayo sobreestiman el estado de tensión real en 15% y 9% utilizando LVDTs y DIC, respectivamente. En el caso del muro de mampostería de ladrillo artesanal, los resultados muestran que los estados de tensión obtenidos utilizando LVDTs y DIC fueron 0.53 MPa con un CV de 6% y 0.50 MPa con un CV de 3% respectivamente. El estado de tensión real fue de 0.48 MPa, considerando una precarga de 150 kN aplicada sobre el muro y el peso de muro sobre el punto de prueba. Por lo tanto, los resultados obtenidos mediante el ensayo sobreestiman el estado de tensión real en 10% y 4% utilizando LVDTs y DIC, respectivamente.

A través del ensayo de flat jack doble realizado en el muro de adobe, se obtuvo un módulo de elasticidad de 610 MPa con un CV de 6% medido utilizando LVDTs y 583 MPa con un CV de 2% utilizando DIC. El módulo de elasticidad obtenido del ensayo de compresión en prismas de adobe fue de 544 MPa. Por lo tanto, los resultados obtenidos del ensayo de flat jack doble sobreestiman los valores obtenidos por el ensayo de compresión en 12% y 7% utilizando LVDTs y DIC, respectivamente. En el caso del muro de mampostería de ladrillo artesanal, se obtuvo un módulo de elasticidad de 1904 MPa con un CV del 10% medido utilizando LVDTs y 1732 MPa con un CV del 4% utilizando DIC. El módulo de elasticidad obtenido del ensayo de compresión en prismas de ladrillo artesanal fue de 1517 MPa. Por lo tanto, los resultados obtenidos del ensayo de flat jack doble sobreestiman los valores obtenidos por el ensayo de compresión en 26% y 14% utilizando LVDTs y DIC, respectivamente.

Estos resultados muestran que el método DIC para medir desplazamientos en los ensayos de flat jack es más eficiente que utilizar LVDTs. Las diferencias en las mediciones de desplazamiento llevadas a cabo con ambos métodos no superaron el 10%. Además, se obtuvo un error menor utilizando DIC en comparación al error obtenido utilizando LVDTs.

En el modelamiento numérico del ensayo de flat jack, el estado de tensión obtenido en el muro de mampostería de adobe fue de 0,33 MPa, lo que demuestra una sobreestimación del 3% con respecto al estado de tensión real (0,32 MPa). El módulo de elasticidad obtenido en el muro de mampostería de adobe fue de 615 MPa con un CV de 3%, el cual sobreestima el módulo de elasticidad utilizado como entrada en el modelo numérico (544 MPa) en 13%. La precisión de los resultados en el ensayo de flat jack depende de la ubicación de los puntos de referencia en el área de ensayo. Se recomienda colocar los puntos de referencia en el centro del área de ensayo para evitar la interacción de la mampostería que la rodea.

En esta investigación, los ensayos de flat jack sobreestiman ligeramente las propiedades mecánicas del muro de mampostería de adobe. Sin embargo, en el caso del muro de mampostería de ladrillo artesanal se aprecia una sobreestimación significativa. Esto puede deberse a una transmisión incorrecta de presiones entre los flat jacks y las hendiduras, las cuales pudieron ser perforadas de forma irregular utilizando el taladro. Con el objetivo de evitar este tipo de problemas, es recomendable utilizar una sierra de diamante para realizar las hendiduras y dispositivos flat jack semicirculares para llevar a cabo los ensayos de flat jack en mampostería de ladrillo artesanal.

Estos resultados muestran que el ensayo de flat jack es adecuado para determinar las propiedades mecánicas de estructuras de mampostería de adobe y ladrillo artesanal. Además, se recomienda la aplicación del ensayo en construcciones patrimoniales donde no se permitan intervenciones destructivas para su caracterización mecánica. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser utilizados como datos de entrada para la calibración de un modelo numérico en un Análisis de Elementos Finitos (FEA) de una estructura de materiales similares a los muros de mampostería ensayados en esta investigación.

CAPÍTULO 3. ENSAYO DE FLAT JACK PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE CONSTRUCCIONES DE ADOBE: EL CASO DE LA IGLESIA VIRGEN DE LA ASUNCIÓN DE SACSAMARCA

Resumen. Este capítulo presenta los resultados de una campaña experimental utilizando la técnica de flat jack en la iglesia de mampostería de adobe "Virgen de la Asunción" ubicada en Sacsamarca, Perú. Las principales propiedades mecánicas de esta construcción fueron determinadas mediante el ensayo de flat jack simple y doble. El ensayo de flat jack es considerado un ensayo semi destructivo (MDT), el cual es apropiado para construcciones históricas debido al daño temporal y fácilmente reparable que se genera. Se realizaron ensayos de flat jack simple y doble en las fachadas norte y este de la iglesia. El ensayo de flat jack simple permitió la estimación de los niveles locales de esfuerzo de compresión a través del monitoreo continuo del estado de deformaciones. El ensayo de flat jack doble permitió determinar el comportamiento esfuerzo – deformación en cada fachada de la iglesia. Las propiedades mecánicas obtenidas en esta investigación son similares a los valores obtenidos por otros autores en construcciones históricas de adobe utilizando diferentes métodos.

3.1. Introducción

La tierra ha sido utilizada como material de construcción en todo el mundo por civilizaciones ancestrales como la de Mesopotamia, Egipto y Anatolia [21] [22]. En el Perú, la construcción más antigua hecha de adobe y mortero de tierra data de aproximadamente 2600 a. C. y está ubicado en Caral, en el valle de Supe [23]. Otros ejemplos de construcciones de adobe son las iglesias andinas construidas en el Perú alrededor del siglo XVI y XVII [24]. El interés en la preservación de edificaciones históricas de mampostería ha ido creciendo en los últimos años [25]. Gran cantidad de estudios e intervenciones han contribuido directa e indirectamente en la generación de información sobre los materiales que constituyen estas estructuras y su proceso de construcción. En particular, se han desarrollado técnicas no destructivas de diagnóstico para determinar el estado real de una estructura de gran valor arquitectónico y cultural sin afectar su integridad [1] [14] [15]. Este trabajo presenta la caracterización mecánica de los muros de adobe que componen el sistema estructural de la iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca mediante el uso de los ensayos de flat jack como ejemplo de la aplicabilidad de una herramienta semi destructiva para determinar el estado de tensión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

3.2. Ensayos de flat jack

El ensayo de flat jack es una técnica semi destructiva que es utilizada para determinar las propiedades mecánicas de las construcciones de mampostería existentes, como son, el estado de tensión, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. El ensayo de flat jack fue utilizado por [7] como parte de un análisis de fallas y el diseño de reforzamiento de puentes de mampostería históricos, y [8] presenta una metodología de ensayo de flat jack in-situ utilizando varios métodos de medición de desplazamiento. Ambos autores concluyen que los ensayos de flat jack in-situ son más eficientes que los ensayos de compresión en laboratorio. El ensayo se divide en dos etapas, los ensayos de flat jack simple y doble, que se describen a continuación.

El ensayo de flat jack simple se basa en el principio de liberación de tensión debido al corte de una hendidura en la junta de mortero de la mampostería. La liberación de tensión en ese punto hace que las secciones de mampostería localizadas por encima y debajo de la hendidura se aproximen entre sí. El estado de tensión local en la mampostería puede

medirse insertando un flat jack en la mampostería y aumentando su presión interna gradualmente hasta que se restaure la distancia original entre los puntos de referencia ubicados sobre y debajo de la hendidura [11].

El ensayo de flat jack doble permite determinar el comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería existente insertando dos flat jacks en hendiduras paralelas, una encima de la otra, en un muro de mampostería. Al aumentar gradualmente la presión interna en los flat jacks, se aplica un esfuerzo de compresión controlado a la mampostería entre los flat jacks. El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la mampostería se pueden obtener midiendo las deformaciones verticales y horizontales en los puntos de referencia colocados en la mampostería entre los flat jacks [12].

Debido a que los flat jacks poseen una rigidez inherente que se opone a su expansión, la presión suministrada en los flat jacks debe corregirse por un factor K_m resultante de una calibración de fábrica. Además, la presión debe corregirse mediante el factor K_a , que es la relación entre el área del flat jack y el área de la hendidura. Finalmente, la presión efectiva se calculó como se muestra en la ecuación 1. Estos factores de corrección influyen directamente en el cálculo del nivel de tensión (flat jack simple) y el módulo de elasticidad (flat jack doble) de la mampostería [12].

$$f_m = K_m K_a P \quad (2)$$

Donde f_m es la presión efectiva en MPa y P es la presión interna en el flat jack en MPa. En esta investigación, se utilizaron flat jacks rectangulares de 40 cm x 20 cm y 6 mm de espesor (suministrados y calibrados por DRC s.r.l., Italia) cuyo factor de calibración $K_m = 0.86$. Para calcular K_a es necesario determinar el área de la hendidura, en esta campaña experimental las hendiduras tenían 2 cm de exceso respecto a los flat jacks. La dimensión de las hendiduras en los ensayos fue de 42 cm x 22 cm, por lo que se obtuvo el factor $K_a = 0.866$.

3.3. La iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca

Sacsamarca es un pequeño pueblo (1500 habitantes) fundado en 1574 y ubicado en Huanca Sancos, Ayacucho por orden del Cabildo de Huamanga. Los jesuitas construyeron la iglesia de Sacsamarca a fines del siglo XVI, como lo indica la inscripción de su campana [26]. Según [3], esta edificación se destaca por ser una de las cinco

primeras parroquias de indígenas erigidas en la ciudad de Ayacucho. Además, representa una de las expresiones más destacadas del arte barroco y conserva lienzos del famoso pintor indígena Diego Quispe Tito, por lo cual el Instituto Nacional de la Cultura lo reconoció como Patrimonio Cultural de la Nación en el 2000 [3].

El sistema estructural de la iglesia incluye muros de adobe con un espesor que varía entre 1.10 m y 1.90 m, pinturas y un sistema de techo de madera. Además, hay seis contrafuertes que sostienen los muros laterales de la iglesia [26]. La Figura 3.1a y la Figura 3.1b muestran tanto el exterior como el interior de la iglesia, mientras que la Figura 3.1c muestra una vista en planta de la iglesia con sección transversal A-A en la Figura 3.1d.

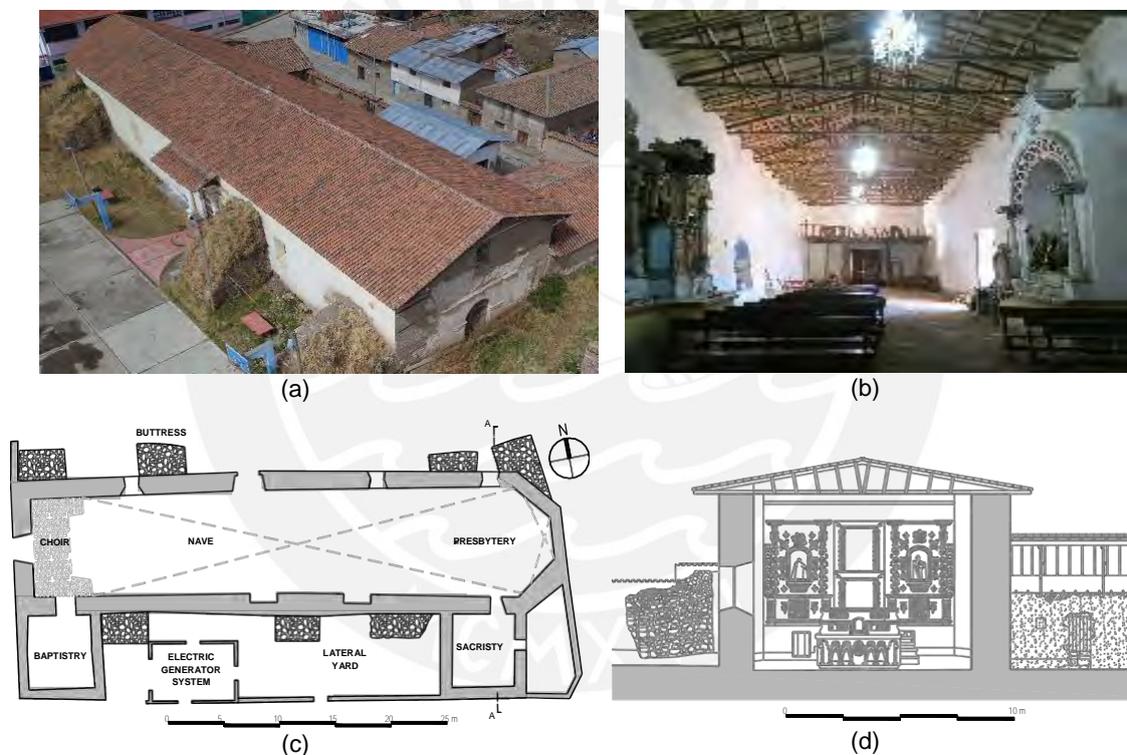


Figura 3.1. Iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca: (a) Vista exterior, (b) vista interior, (c) vista en planta y (d) sección transversal A-A.

3.3.1. Localización de los ensayos

Los ensayos se aplicaron en dos fachadas de la iglesia (muros norte y este). Ambos puntos de ensayos se ubicaron en muros representativos de mampostería de iglesia, además existe acceso y espacio adecuado para los ensayos de flat jack. La Figura 3.2 muestra la ubicación de los ensayos en la iglesia.

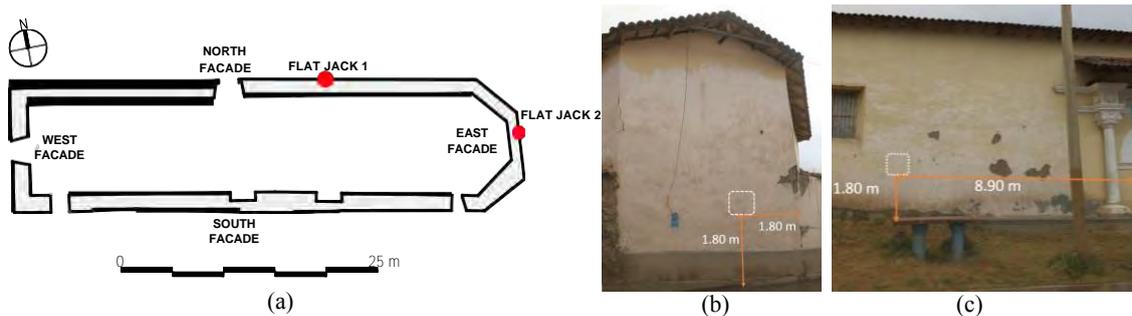


Figura 3.2. Ubicación de los ensayos de flat jack en la iglesia (a) vista en planta, (b) fachada este y (c) fachada norte.

El ensayo en la fachada este, adyacente a la calle, se realizó a 1.80 m de altura desde el nivel de la acera y a 1.80 m de distancia desde la cerca de adobe. El ensayo en la fachada norte, adyacente a la losa deportiva, se realizó a 1.80 m de altura desde el nivel del piso y 8.90 m de distancia desde la puerta lateral de la iglesia.

3.3.2. Procedimiento del ensayo de flat jack simple

Como se muestra en la Figura 3.3a, la capa de yeso fue removida y los puntos de referencia se colocaron en el área de ensayo antes de realizarse la hendidura. Después de haber medido la longitud entre los puntos de referencia, se realizó la hendidura utilizando un taladro, como se muestra en la Figura 3.3b. Finalmente, el flat jack fue insertado en la hendidura (Figura 3.3c) finalizando la instrumentación del ensayo.

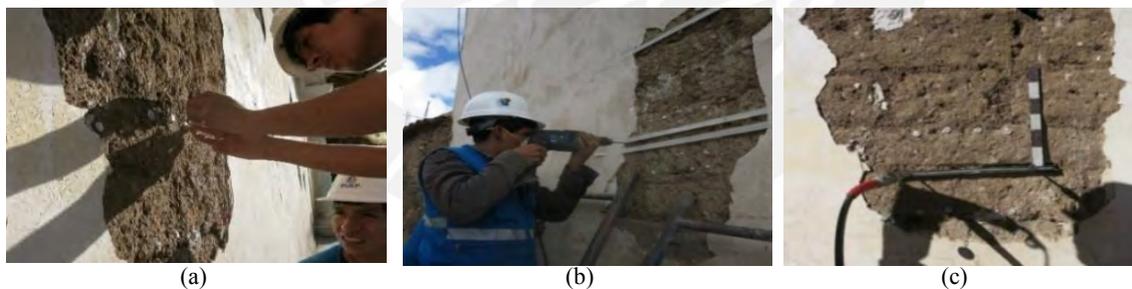


Figura 3.3. Instrumentación del ensayo de flat jack simple: (a) Acondicionamiento de la superficie y ubicación de los puntos de referencia, (b) Perforado de la hendidura para la inserción del flat jack, y (c) Ensayo de flat jack instrumentado.

La Figura 3.4a muestra una representación esquemática del ensayo de flat jack simple, mientras que la Figura 3.4b muestra la distribución de los puntos de referencia verticales (V1, V2, V3 y V4) en la campaña experimental. Utilizando una bomba hidráulica, se suministró presión en el flat jack y se registraron las deformaciones en los puntos de referencia.

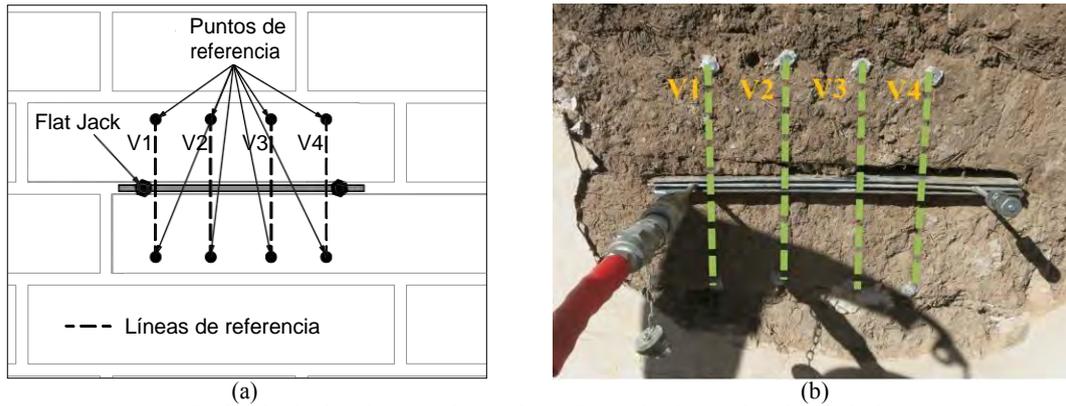


Figura 3.4. Ensayo de flat jack simple para determinar el estado de tensión local de la mampostería: (a) representación esquemática y (b) campaña experimental.

3.3.3. Procedimiento del ensayo de flat jack doble

Una nueva hendidura fue realizada de modo que una porción de muro quede aislada de la mampostería circundante (Figura 3.5a). Después de que insertar el segundo flat jack, los puntos de referencia verticales y horizontales son colocados en la mampostería entre ambos flat jacks, como se muestra en la Figura 3.5b. La medición de las deformaciones entre los puntos de referencia se realizó utilizando LVDTs, los cuales son distribuidos en cuatro LVDTs verticales y uno horizontal, como se aprecia en la Figura 3.5c.

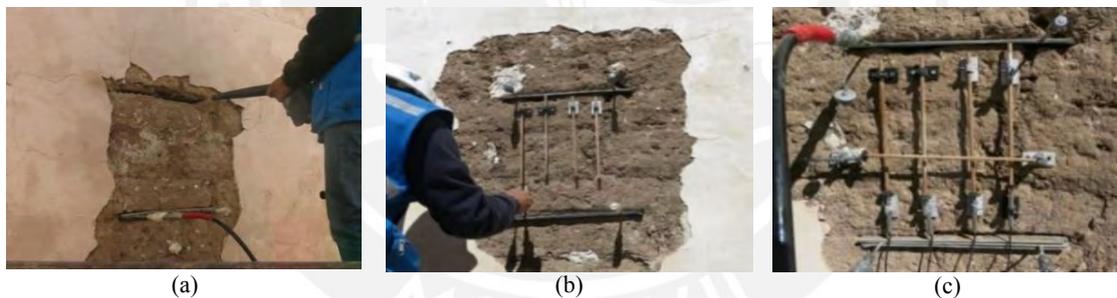


Figura 3.5. Instrumentación del ensayo de flat jack doble en la iglesia: (a) Perforado de la hendidura para la inserción del segundo flat jack, (b) instrumentación de LVDTs y (c) ensayo de flat jack instrumentado.

La Figura 3.6a muestra una representación esquemática del ensayo de flat jack doble, mientras que la Figura 3.6b muestra la distribución de los puntos de referencia verticales (V1, V2, V3 y V4) y horizontal (H) en la campaña experimental. Utilizando una bomba hidráulica, se suministró presión en ambos flat jacks y se registraron las deformaciones en los puntos de referencia.

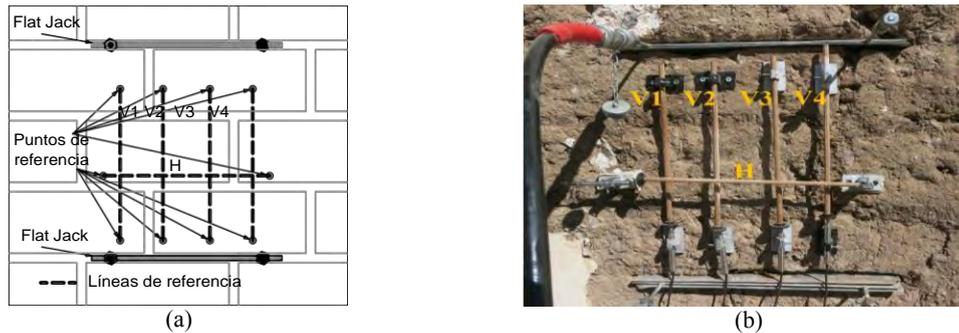


Figura 3.6. Ensayo de flat jack doble para determinar el comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería de la iglesia: (a) representación esquemática y (b) campaña experimental.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Ensayo de flat jack simple

La Tabla 3.1 muestra la longitud vertical inicial (V) entre los puntos de referencia antes de realizar la primera hendidura en los ensayos de flat jack simple. Se debe tener en cuenta que debido a la superficie erosionada del adobe, el punto de referencia V2 no fue adecuadamente adherido por lo que tuvo que ser descartado.

Tabla 3.1. Longitud inicial entre puntos de referencia en ambas fachadas para los ensayos de flat jack simple.

Punto de referencia	Longitud (mm)	
	Fachada norte	Fachada este
V1	245.80	244.58
V2	245.52	DESCARTADO
V3	245.92	243.78
V4	245.68	245.19

La Figura 3.7 y la Figura 3.8 muestran la evolución de la deformación en los puntos de referencia debido al incremento de presión en los flat jacks en ambas fachadas.

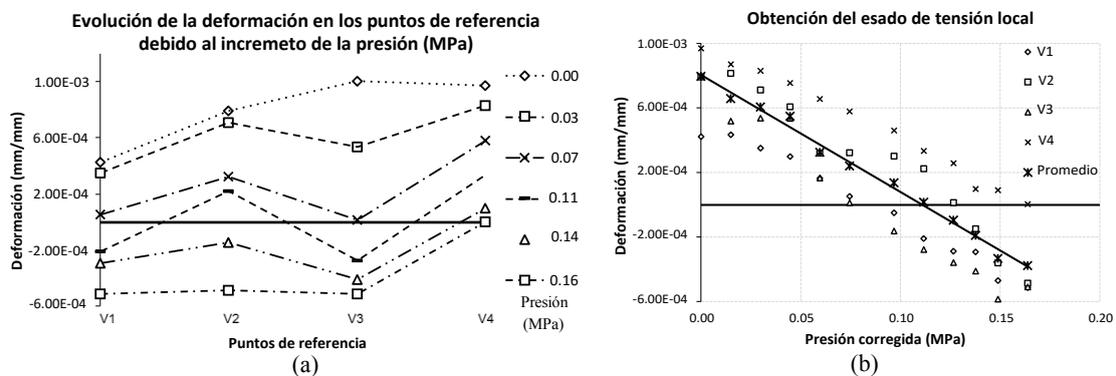


Figura 3.7. Diagrama de monitoreo de deformación en el ensayo de flat jack simple en la fachada norte a) Evolución de deformaciones y b) obtención del estado local de la tensión.

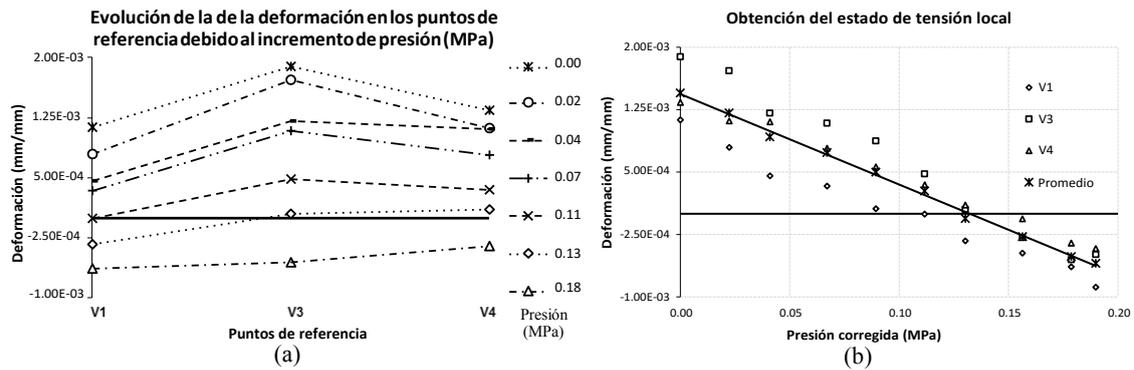


Figura 3.8. Diagrama de monitoreo de deformación en el ensayo de flat jack simple en la fachada este a) Evolución de deformaciones y b) obtención del estado local de la tensión.

Las deformaciones en los puntos de referencia V1 y V4 en la fachada norte (Figura 3.7a) y la fachada este (Figura 3.8a) presentan una variación menor en comparación con el resto de puntos de referencia. Probablemente, se deba a la interacción de la mampostería que rodea el área de ensayo, la cual proporciona rigidez adicional a la mampostería ensayada. La Figura 3.7b y la Figura 3.8b muestran el estado de las tensiones para cada fachada obtenida por la intersección del gráfico con la abscisa. Las presiones se presentan en MPa.

La Tabla 3.2 muestra que el promedio del estado de tensiones en los muros varía entre 0.11 MPa y 0.13 MPa. En base a este estado de tensión y la altura de la mampostería sobre el área de ensayo, fue posible estimar la densidad de la mampostería obteniendo un valor que varía entre 1920 Kg/m³ y 2250 Kg/m³.

Tabla 3.2. Estado de tensiones en las fachadas norte y este de la iglesia.

Punto de referencia	Estado de tensión (MPa)	
	Fachada norte	Fachada este
V1	0.08	0.10
V2	0.12	0.14
V3	0.09	DIESCARTADO
V4	0.17	0.15
Promedio	0.11	0.13
Desviación estándar	0.04	0.02

3.4.2. Ensayo de flat jack doble

Tabla 3.3 muestra las longitudes vertical (V) y horizontal (H) iniciales entre puntos de referencia después de realizadas las hendiduras.

Tabla 3.3. Longitud inicial entre puntos de referencia en ambas fachadas de la iglesia para el ensayo de flat jack doble.

Punto de referencia	Longitud (mm)	
	Fachada norte	Fachada este
V1	320	320
V2	320	320
V3	320	320
V4	315	315
H	350	120

La Figura 3.9 y Figura 3.10 muestran la evolución de la deformación en los puntos de referencia debido al incremento de presión en los flat jacks que permite obtener el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson en la mampostería de adobe existente. Como se muestra en la Figura 3.9a y la Figura 3.10a, se aplicó una estimación de tendencia lineal al promedio de deformaciones vertical y la presión corregida. Con coeficientes de determinación (R^2) de 0.99, estas tendencias lineales muestran que los ensayos se realizaron en el rango elástico de la mampostería. La Figura 3.9b y la Figura 3.10b muestran la deformación horizontal en ambas fachadas, que divididas por la deformación vertical da como resultado el coeficiente de Poisson.

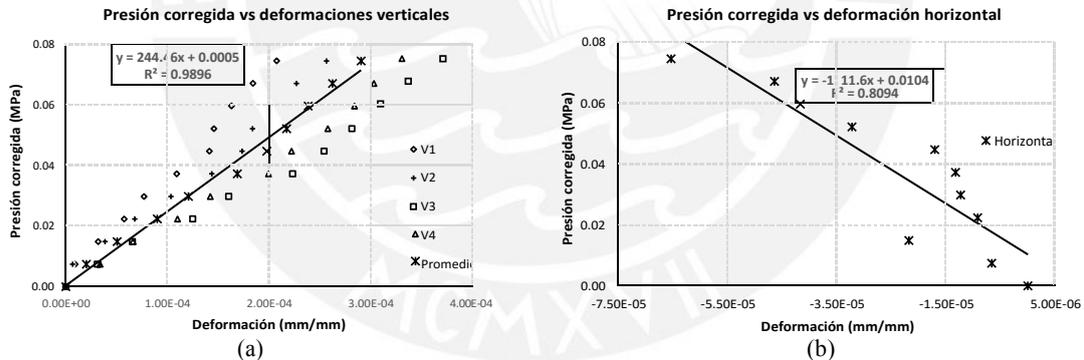


Figura 3.9. Diagrama del monitoreo de esfuerzo – deformación del ensayo de flat jack doble en la fachada norte de la iglesia. Evolución de a) deformaciones verticales y b) deformaciones horizontales.

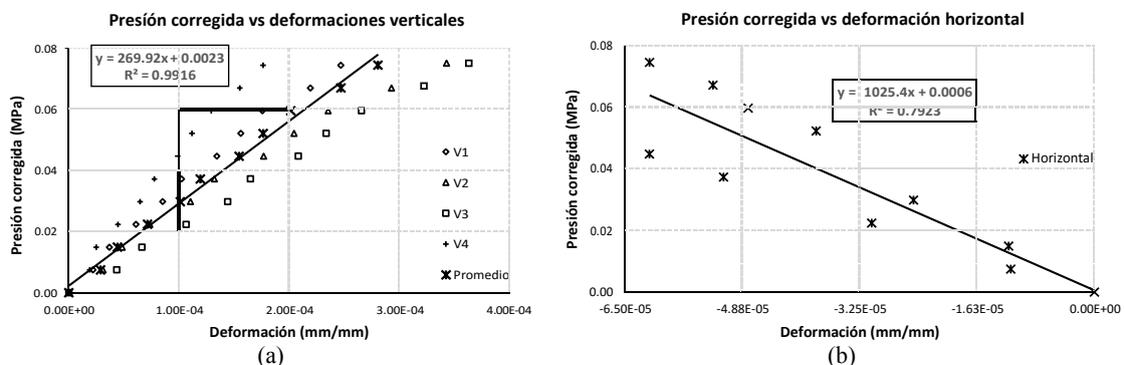


Figura 3.10. Diagrama del monitoreo de esfuerzo – deformación del ensayo de flat jack doble en la fachada este de la iglesia. Evolución de a) deformaciones verticales y b) deformaciones horizontales.

La Tabla 3.4 muestra que el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson estimados a partir de los ensayos de flat jack doble aplicados en la mampostería de adobe de la iglesia fueron $273,68 \pm 80$ MPa y $0,24 \pm 0,03$ respectivamente, los cuales se encuentran dentro del rango de valores reportados por [27] [28].

Tabla 3.4. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de la mampostería de adobe de la iglesia obtenidos mediante los ensayos de flat jack doble.

Propiedad	Punto de referencia	Fachada norte	Fachada este	Promedio y desviación estándar
Módulo de elasticidad (MPa)	V1	342.11	302.86	273.68 ± 80
	V2	274.17	221.39	
	V3	192.54	213.81	
	V4	215.98	426.60	
Coefficiente de Poisson	H	0.22	0.26	0.24 ± 0.03

3.5. Conclusiones

Los resultados de los ensayos de flat jack realizados en la iglesia muestran que el estado de tensión en los muros varía entre 0.11 MPa en la fachada norte y 0.13 MPa en la fachada este, con un CV de 33 % y 17 % respectivamente. La densidad estimada utilizando el estado de tensiones, la altura de la mampostería sobre el área de ensayo y la carga del techo fue en promedio 2085 Kg/m^3 con un CV de 11 %. A través de los ensayos de flat jack doble, se obtuvo un módulo de elasticidad de 273 MPa con un coeficiente de variación (CV) de 29.3 %, que se encuentra dentro del rango de valores estimados por otros autores. Finalmente, el coeficiente de Poisson obtenido fue de 0.24 con un CV de 12.5 %. Estos resultados muestran que el ensayo de flat jack es adecuado para determinar las propiedades mecánicas de las estructuras de adobe existentes. El daño generado en la junta de mortero de la mampostería fue temporal y fácilmente reparable al rellenar las hendiduras con mortero de características similares. En muros de adobe con erosión causada por la lluvia y el viento, es recomendable limpiar la superficie de la pared con el objetivo de obtener un adecuado posicionamiento de los puntos de referencia.

Adicionalmente, con el objetivo de obtener una transmisión correcta de presiones entre el flat jack y la hendidura, la hendidura debe realizarse de manera uniforme y si es posible con las dimensiones exactas de los flat jacks. Finalmente, se recomienda aplicar este ensayo en construcciones patrimoniales donde no se permita una intervención destructiva para determinar las propiedades mecánicas de la mampostería que la conforma. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser utilizados como datos de entrada

en la calibración de un modelo en un Análisis de Elementos Finitos (FEA) de la iglesia y luego proponer una intervención para su restauración si fuese necesaria.



CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA REALIZAR ENSAYOS DE FLAT JACK SIMPLE Y DOBLE EN CONSTRUCCIONES DE ADOBE



Resumen. Este capítulo presenta un resumen de las lecciones aprendidas en las campañas experimentales del ensayo de flat jack aplicados en muros de mampostería de adobe y la iglesia Virgen de la Asunción de Sacsamarca. Adicionalmente, se presenta una propuesta de metodología de aplicación de los ensayos de flat jack simple y doble donde se incluyen los procesos, consideraciones y recomendaciones para una correcta instrumentación, desarrollo y obtención de resultados.

4.1. Lecciones aprendidas en los ensayos de caracterización de mampostería de adobe

4.1.1. Lecciones de ensayos en laboratorio

Durante el ensayo de flat jack simple en la campaña experimental en laboratorio, se tuvo en cuenta el tiempo de perforado de la hendidura y el tiempo necesario para restituir el nivel de tensión inicial mediante el flat jack. Estos tiempos deben ser en lo posible iguales para evitar el fenómeno de fluencia viscosa (creep). Este fenómeno aparece la mampostería es sometida a una carga o descarga progresiva durante cierto tiempo. Si los tiempos de descarga y carga (presurización en el flat jack) son similares, se evita que las deformaciones producidas por este fenómeno interfieran en los resultados.

Otro aspecto a tener en cuenta en la campaña experimental es la carga que actúa sobre el punto de ensayo. Las normativas existentes de ensayos de flat jack no proporcionan presiones mínimas en el punto de ensayo. Sin embargo, si se especifica que el peso de la mampostería sobre el punto de ensayo debe asegurar que la presión en el flat jack se distribuya adecuadamente evitando que la sección superior de mampostería se levante por falta de confinamiento. En la campaña experimental, una carga progresiva fue aplicada sobre el muro mediante una celda de carga. La carga aplicada simula una altura de mampostería aproximada de 15 m correspondiente a una presión de 0.3 MPa. Sin embargo, se propone una presión mínima de 0.05 MPa como la necesaria para evitar este tipo de problemas, esta presión en el punto de ensayo se traduce en una altura de 2.5 m a 3 m de mampostería.

Finalmente, se diseñaron soportes para LVDTs, los cuales fueron impresos en 3D con material ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) como alternativa a los soportes metálicos que usualmente son utilizados en los laboratorios. El principal inconveniente que conllevan estos soportes metálicos es la difícil instrumentación en la superficie de los adobes, originando desprendimientos durante el ensayo. En cambio, los soportes de ABS propuestos poseen una densidad 6 veces menor a la densidad de los soportes metálicos. Finalmente, los soportes de ABS fueron fijados a la superficie del adobe utilizando dos tornillos por cada soporte. Esta alternativa resultó ser muy eficaz para la campaña experimental, pues al ser el ensayo de flat jack una técnica in-situ, se requiere un equipamiento fácil de transportar e instrumentar.

4.1.2. Lecciones de ensayos en campo

Los muros de mampostería de adobe en las construcciones antiguas suelen presentar erosión en las unidades de albañilería debido a factores climatológicos como la lluvia. Esto dificulta el colocado de los puntos de referencia en la superficie de la mampostería o posibles desprendimientos durante los ensayos. Para evitar este tipo de problemas, se recomienda limpiar la superficie erosionada si fuese posible así mismo evitar colocar los puntos de referencia en las juntas pues son susceptibles a desprendimientos durante el ensayo.

Al realizar las hendiduras mediante el taladro se debe tener en cuenta que el adobe es un material frágil por lo que las hendiduras deben realizarse enteramente en las juntas de mortero y no deben comprometer a las unidades de albañilería. Por lo general las juntas de barro en mampostería de adobe suelen tener un espesor igual o mayor a 1 cm. Durante el perforado de las hendiduras, puede darse el caso que se desprenda el espesor completo de junta. El espesor de los dispositivos flat jack suele variar entre 6 a 8 mm por lo que al ser insertados en hendiduras de mayores dimensiones originan espacios libres entre el flat jack y la hendidura. Estos espacios pueden ser rellenados con placas de acero de igual dimensión que el flat jack para asegurar la correcta transmisión de presiones. Finalmente, antes de iniciar el ensayo se debe suministrar una presión inicial para recomodar las placas y asegurar el contacto flat jack – placa – mampostería, luego descargar la presión suministrada e iniciar el procedimiento habitual de los ensayos.

En la campaña experimental en campo, los puntos de ensayo fueron ubicados a una altura de 1.80 m sobre el nivel de piso. Esto se debe a la presencia del sobrecimiento de piedra que suele existir en este tipo de construcciones. Para evitar la interacción del sobrecimiento en la mampostería de adobe, se debe aplicar el ensayo a una altura no menor a 0.60 m de la unión entre ambos materiales. La altura final sobre el nivel del piso conlleva a la necesidad de armar un andamio con una plataforma adecuada para la instalación del equipo y configuración del ensayo.

4.2. Propuesta de metodología para la aplicación de ensayos de flat jack en construcciones de adobe

El ensayo de flat jack es una técnica semi destructiva que es utilizada para determinar las propiedades mecánicas de las construcciones de mampostería existentes, como son, el

estado de tensión, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. El ensayo de flat jack se divide en dos etapas, el ensayo de flat jack simple y doble. En la Figura 4.1 se muestran los subprocesos y el flujo de trabajo para determinar las propiedades mecánicas de una construcción de mampostería utilizando el ensayo de flat jack.

4.2.1. Flat jack simple

El ensayo de flat jack simple se basa en el principio de liberación de tensión debido al corte de una hendidura en la junta de barro en la mampostería de adobe. La liberación de tensión en ese punto hace que las secciones de mampostería de adobe localizadas por encima y debajo de la hendidura se aproximen entre sí. El estado de tensión local puede medirse insertando un dispositivo flat jack en la hendidura y aumentando su presión interna gradualmente hasta que se restaure la distancia original entre los puntos de referencia ubicados sobre y debajo de la hendidura [11]. La Figura 4.1 muestra un flujograma de la metodología de aplicación del ensayo de flat jack simple en construcciones de adobe.

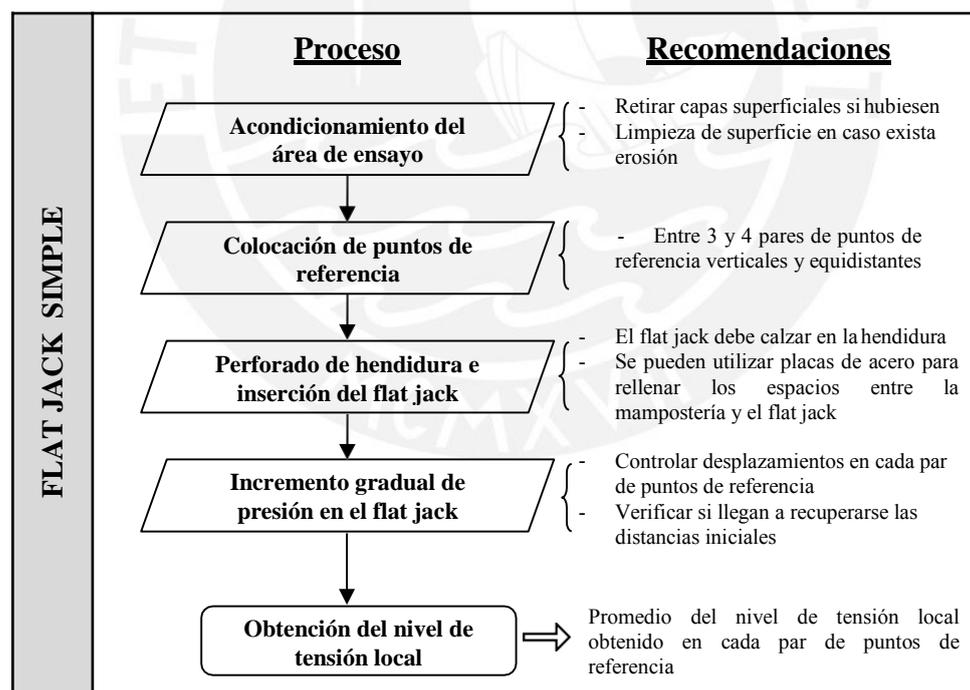


Figura 4.1. Metodología para la obtención del nivel de tensión local en una construcción de mampostería de adobe utilizando el ensayo de flat jack simple.

Acondicionamiento del área de ensayo

Las construcciones de mampostería de adobe suelen presentar capas superficiales de yeso. En el ensayo de flat jack es necesario que estas capas sean retiradas y se debe asegurar

que los adobes y juntas de barro se encuentren visibles para obtener un correcto monitoreo de desplazamientos en los puntos de referencia. Si los adobes presentan daños por erosión (condiciones climatológicas) se debe retirar el material erosionado de la superficie de los adobes, esto con el objetivo de evitar el futuro desprendimiento de los puntos de referencia durante los ensayos.

Adicionalmente, se debe elegir un área de ensayo donde se pueda asegurar que los puntos de referencia proyectados en los adobes mantengan la verticalidad y horizontalidad necesaria para el monitoreo de deformaciones.

Colocación de puntos de referencia

En el ensayo de flat jack simple, se recomienda colocar los puntos de referencia verticales e igualmente espaciados si fuese posible. La ASTM recomienda colocar cuatro pares de puntos de referencia verticales en el área de ensayo [11], mientras que la RILEM recomienda que se ubiquen al menos tres pares de puntos de referencia verticales en la parte central del área de ensayo [9].

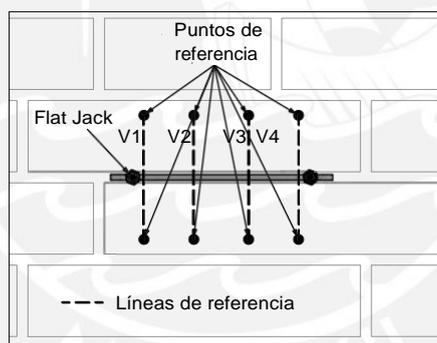


Figura 4.2. Representación esquemática de la ubicación de los puntos de referencia en el ensayo de flat jack simple.

Los puntos de referencia deben estar ubicados en la superficie de los adobes y no en las juntas de barro, pues éstas podrían desprenderse durante el ensayo e invalidar los datos obtenidos por puntos de referencia situados en dichas juntas. Para un correcto análisis de resultados y obtención del promedio de deformaciones, se debe tener al menos tres pares de puntos de referencia en correcto funcionamiento durante todo el ensayo.

Finalmente, se debe tomar medida de la distancia entre los puntos de referencia antes de realizar la hendidura para la inserción del flat jack. Estas distancias serán las distancias iniciales las cuales serán recuperadas durante el ensayo de flat jack simple.

Perforado de la hendidura e inserción del flat jack

Para realizar la hendidura se puede utilizar un taladro no percutor con brocas especiales para mampostería de 6 mm de grosor y 20 cm de longitud. Con estas herramientas se logra obtener una hendidura de 40 cm de ancho por 20 cm de profundidad y 6 a 8 mm de espesor. Los dispositivos flat jacks de 40 x 20 cm y espesores que varían entre 6 y 8 mm son los más recomendables para este tipo de construcciones. A diferencia de dispositivos de otra geometría, éstos poseen un mejor factor de calibración de fábrica lo cual se traduce en una mejor transmisión de presiones entre el flat jack y la mampostería de adobe.

Con el objetivo que el daño ocasionado por el ensayo sea menor y fácilmente reparable, la hendidura debe realizarse en la junta de barro evitando afectar los adobes en lo posible. Finalmente, se debe retirar las partículas de mortero que aún queden dentro de la hendidura para insertar el dispositivo flat jack sin problemas y conectar mediante mangueras al sistema de presión hidráulico.

Incremento gradual de presión en el flat jack

Mediante una bomba hidráulica se suministra presión en el dispositivo flat jack. La presión se incrementa gradualmente monitoreando los desplazamientos en los puntos de referencia. Una vez se consiga reestablecer la distancia inicial entre los puntos de referencia el ensayo finaliza y se conoce la presión de cancelación, que es la presión necesaria para restituir el nivel de tensión local en el punto de ensayo.

Para evitar el fenómeno de fluencia viscosa mencionado anteriormente (creep) el tiempo de perforado de la hendidura debe ser similar al tiempo que toma restituir las distancias iniciales en los puntos de referencia. En promedio, el tiempo que toma realizar cada hendidura en los muros de mampostería de adobe es de una hora. Por ello, el incremento gradual de presiones en el flat jack debe realizarse de modo que en un tiempo aproximado de una hora se restablezca el nivel de tensión existente en el área de ensayo antes de realizarse la hendidura en la mampostería de adobe.

4.2.2. Flat jack doble

El ensayo de flat jack doble permite determinar el comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería de adobe existente insertando dos dispositivos flat jack en hendiduras paralelas, una encima de la otra, en el muro de mampostería de adobe. Al

aumentar gradualmente la presión interna en los flat jacks, se aplica un esfuerzo de compresión controlado a la mampostería entre los flat jacks. El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la mampostería de adobe se pueden obtener monitoreando las deformaciones verticales y horizontales en los puntos de referencia colocados en la mampostería de adobe entre los flat jacks [12]. La Figura 4.3 muestra un flujograma de la metodología de aplicación del ensayo de flat jack doble en construcciones de adobe.

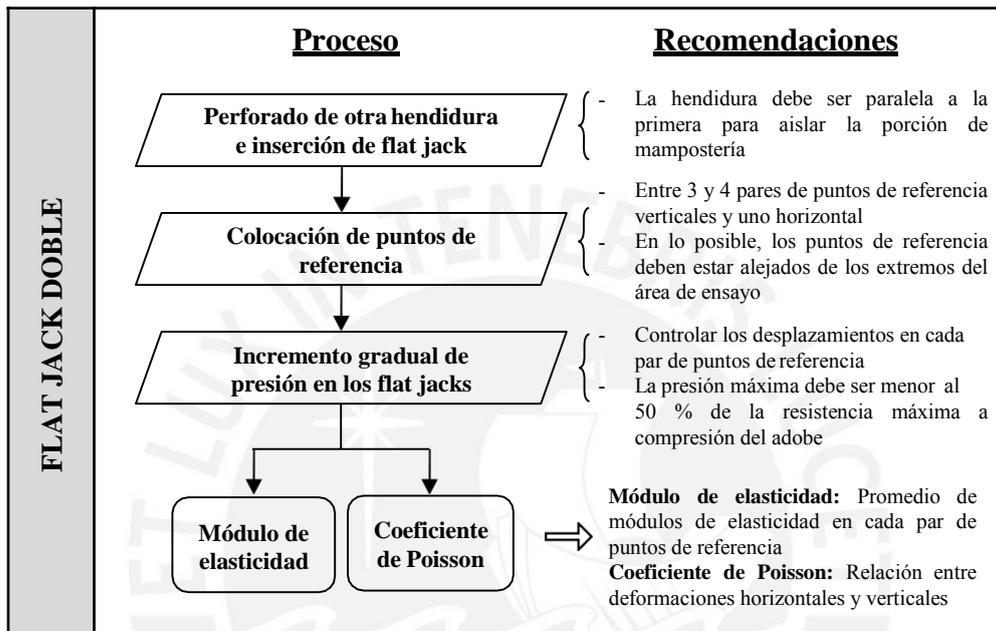


Figura 4.3. Metodología para la obtención del comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería de una construcción de adobe utilizando el ensayo de flat jack doble.

Perforado de la segunda hendidura e inserción del flat jack

Una vez finalizado el procedimiento del ensayo de flat jack simple se desinstalan los puntos de referencia y se desconectan las mangueras de conexión del flat jack. Luego, se realiza la segunda hendidura paralela a la primera. El procedimiento para realizar la segunda hendidura es similar a la primera y se debe tener especial cuidado con las entradas de aceite en el dispositivo flat jack insertado en la primera hendidura. Se debe evitar que al realizar la segunda hendidura el polvo o restos de mortero producto del perforado de adobe o junta de barro se impregnen en dichas entradas y así asegurar una correcta transmisión de presiones a los dispositivos flat jack.

Finalmente, se inserta el segundo dispositivo flat jack en la hendidura recién perforada. Las mangueras son conectadas al sistema de presión hidráulico asegurando la transferencia de la misma presión en ambos flat jacks. De esta manera, la mampostería

de adobe encerrada entre ambos flat jacks queda aislada y lista para ser sometida a compresión mediante la presión suministrada por la bomba hidráulica.

Colocación de puntos de referencia

Se recomienda colocar los puntos de referencia verticales, horizontales e igualmente espaciados si fuese posible. La ASTM recomienda colocar cuatro puntos de referencia verticales en el área de ensayo [12], mientras que la RILEM recomienda que se ubiquen al menos tres puntos de referencia verticales y uno horizontal en la parte central del área de ensayo [10].

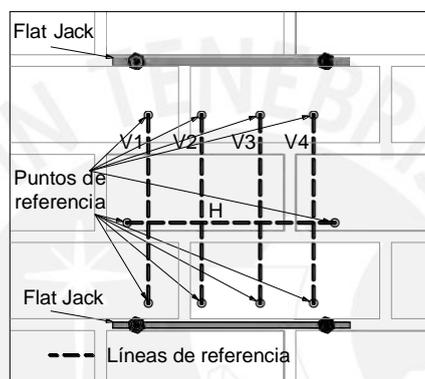


Figura 4.4. Representación esquemática de la ubicación de los puntos de referencia en el ensayo de flat jack doble.

Los puntos de referencia deben estar ubicados en la superficie de los adobes evitando las juntas de barro de la mampostería, pues éstas podrían desprenderse durante el ensayo e invalidar los datos obtenidos por los puntos de referencia colocados en dichas juntas. Para un correcto análisis de resultados y obtención del promedio de deformaciones, se debe tener al menos tres puntos de referencia verticales en correcto funcionamiento durante todo el ensayo. La distancia entre puntos de referencia recomendada para el ensayo de flat jack doble debe estar entre el 75 % y 95 % de la distancia entre ambos flat jacks en el ensayo.

Incremento gradual de presión en los flat jacks

Mediante una bomba hidráulica se suministra presión en ambos flat jacks. La presión se incrementa gradualmente monitoreando los desplazamientos en los puntos de referencia. Se grafica el comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería de adobe haciendo uso de la presión aplicada y las deformaciones en los puntos de referencia.

Para obtener el módulo de elasticidad de la mampostería de adobe, se promedia los módulos de elasticidad obtenidos por cada punto de referencia vertical en el área de ensayo. El coeficiente de Poisson es obtenido como la razón entre las deformaciones horizontales y las deformaciones verticales en el área de ensayo de la mampostería de adobe.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES



5.1. Conclusiones

Los resultados de la campaña experimental del ensayo de flat jack aplicado en los muros de mampostería muestran que, en general, medir los desplazamientos mediante DIC resulta más eficiente que utilizar LVDTs. La variación en los resultados utilizando ambos métodos no supera el 10%. Adicionalmente, el error obtenido en cada ensayo utilizando DIC resulta menor en comparación al error obtenido mediante los LVDTs. En general, los ensayos de flat jack aplicados en el muro de mampostería de adobe sobreestiman ligeramente los resultados obtenidos mediante los ensayos de compresión en prismas. Sin embargo, en caso del muro de mampostería de ladrillo artesanal, se aprecia una mayor sobreestimación en comparación al muro de adobe. Esto puede ser debido a una incorrecta transmisión de presiones entre los flat jacks y las hendiduras perforadas utilizando un taladro. Estas hendiduras suelen ser más irregulares en la mampostería de ladrillo artesanal que en la mampostería de adobe. Con el objetivo de evitar este tipo de problemas, es recomendable utilizar una sierra circular y flat jacks semicirculares para el ensayo de flat jack en mampostería de ladrillo.

El modelamiento numérico del ensayo de flat jack demostró que los resultados obtenidos mediante la simulación de este ensayo son bastante cercanos a los valores reales utilizados como input (con sobreestimaciones de 3% y 13% en caso de los ensayos de flat jack simple y doble, respectivamente). Además se demostró que el estado de tensiones obtenido utilizando el ensayo de flat jack simple no depende de la posición de los puntos de referencia en el área de ensayo. Por el contrario, el ensayo de flat jack doble muestra que los resultados obtenidos utilizando los puntos de referencia ubicados en los extremos del área de ensayo sobreestiman hasta en mayor un 15 % los valores reales. Esto se debe a la influencia que tiene la mampostería que rodea el área de ensayo.

Los resultados obtenidos del ensayo de flat jack simple realizado en la iglesia muestran que el estado de tensiones de los muros se encuentra entre 0.11 MPa en la fachada norte y 0.13 MPa en la fachada este, con un coeficiente de variación (CV) de 33% y 17 %, respectivamente. La densidad estimada utilizando el estado de tensiones, la altura de la mampostería sobre el área de ensayo y la carga del techo fue en promedio 2085 Kg/m³ con un CV de 11%.

Mediante el ensayo de flat jack doble, se obtuvo un módulo de elasticidad de 273 MPa con un CV de 29.3 %, este valor se encuentra dentro del rango de valores estimados por otros autores. Finalmente, el coeficiente de Poisson obtenido fue de 0.24 con un CV de 12.5 %

Estos resultados muestran que el ensayo de flat jack es adecuado para determinar las propiedades mecánicas de estructuras de adobe existentes. El daño generado por el ensayo en las junta de mortero fue temporal y fácilmente reparable rellenando las hendiduras con material de características similares al original. En muros de adobe con presencia de erosión causada por lluvias y viento, es recomendable limpiar la superficie erosionada para obtener un adecuado posicionamiento de los puntos de referencia. Adicionalmente, con el objetivo de obtener una adecuada transmisión de presiones entre los flat jacks y las hendiduras, éstas deben ser realizadas de manera uniforme y si es posible con las dimensiones exactas de los flat jacks.

Por lo tanto, es recomendable aplicar este ensayo en construcciones patrimoniales, donde no se permiten ensayos destructivos, para determinar las propiedades mecánicas de la mampostería que conforman la estructura. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden servir como datos de entrada para la calibración de un modelo de análisis de elementos finitos (MEF) de la iglesia y posteriormente proponer una intervención para su restauración en caso sea necesario.

5.2. Trabajo futuro

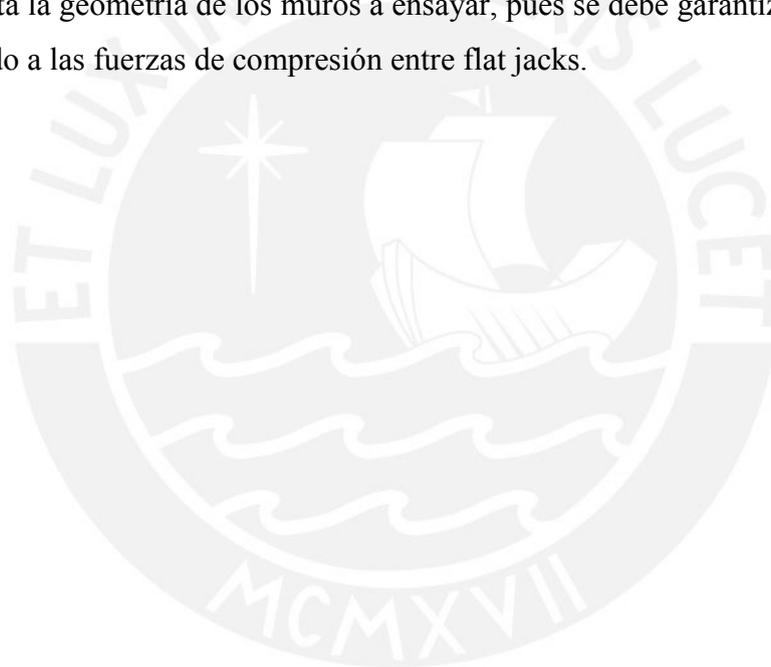
En esta investigación se asume que el flat jack transmite las presiones hacia la mampostería mediante el área total de la hendidura, sin embargo esto puede no ser completamente cierto. Por ello, se propone un estudio de la influencia del área neta de transmisión de presiones mediante el uso de películas de carbón entre los flat jacks y las hendiduras para obtener el área de transmisión de presiones efectiva de los flat jacks hacia la mampostería.

El procedimiento del ensayo de flat jack utilizado en esta investigación se puede mejorar mediante la optimización en la ejecución de las hendiduras para los ensayos. En caso del ensayo de flat jack doble, se podría proponer nuevas metodologías de corte de las

hendiduras para un correcto asilamiento de la porción de mampostería a ensayar y así evitar la influencia de la mampostería alrededor del área de ensayo.

Dado que el ensayo de flat jack es una técnica in-situ, se puede estudiar la influencia de esta característica en los resultados del ensayo. Esto se puede obtener mediante la aplicación del ensayo en los muros de mampostería de una estructura (construida en laboratorio) y comparar los resultados con los obtenidos en especímenes extraídos de los mismos muros de mampostería. De este modo se obtiene como influye la extracción de especímenes en los resultados del ensayo.

Se recomienda estudiar la posibilidad de estimar el esfuerzo de compresión máximo en la mampostería mediante una extensión del ensayo de flat jack doble. Para esto se debe tener en cuenta la geometría de los muros a ensayar, pues se debe garantizar una falla en el muro debido a las fuerzas de compresión entre flat jacks.



REFERENCIAS

- [1] Briceño, C. P. (2016). Diagnóstico estructural y análisis sísmico de la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
- [2] GOM mbH (2010), ARAMIS User Information Hardware.
- [3] INC (2000). Resolución Directoral Nacional N° 087. El Peruano.
- [4] Lombillo, I., Thomas, C., Villegas, L., Fernández-Álvarez, J. P., & Norambuena-Contreras, J. (2013). Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests. *Construction and Building Materials*, 43, 266-277.
- [5] Rossi, P. P. (1982). Analysis of mechanical characteristics of brick masonry by means of non-destructive. In *Sesto congresso internazionale sulle murature in mattoni*. Roma, 16-19 maggio 1982. Sixth international brick masonry conference. Rome, 77-85.
- [6] Rossi, P. P. (1987). Flat-jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structures, In: *Proc 7th international brick masonry conference*, vol. 1.
- [7] Bergamo, O., Campione, G., Donadello, S., & Russo, G. (2015). In-situ NDT testing procedure as an integral part of failure analysis of historical masonry arch bridges. *Engineering Failure Analysis*, 57, 31-55.
- [8] Łatka, D., & Matysek, P. (2017). The estimation of compressive stress level in brick masonry using the flat-jack method. *Procedia Engineering*, 193, 266-272.
- [9] RILEM TC 177. (2004). Test method recommendation of RILEM TC 177-MDT Masonry durability and on-site testing-D. 4: in-situ stress tests based on the flat jack,» *Mater Struct*, vol. 37, 491-496.
- [10] RILEM TC 177 (2004). Test method recommendation of RILEM TC 177-MDT Masonry durability and on-site testing-D. 5: in-situ stress-strain behavior tests based on the flat jack,» *Mater Struct*, vol. 37, 497-501.
- [11] ASTM C 1196-04(2004). Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements.
- [12] ASTM C 1197-04 (2004). Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method.
- [13] Roca, P. (2007). Aplicación de técnicas experimentales y numéricas al estudio del patrimonio arquitectónico. In *Proc. Conf. sobre Metodologías no destructivas aplicables a la rehabilitación del patrimonio construido*, Universidad de Cantabria, Santander, Spain, 53-70.
- [14] Vargas, J., Aguilar, R., Gonzales, M., & Briceño, C. (2013). Structural intervention in saint peter the apostle church of Andahuaylillas in Cusco, Peru. In *Proc. of the 13th Ibero-American Seminar on Earthen Architecture and Construction*.
- [15] Noel, M. (2017). Integración de ingeniería inversa y modelamiento numérico para la evaluación sísmica de construcciones históricas de adobe. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
- [16] SENCICO (2006). Proyecto de Norma Técnica de Edificación E.070, Albañilería. Comité Técnico de la Norma E.070.

- [17] San Bartolomé, A., Quiun, D., & Mendoza, G. (2007). Estudio Experimental del factor de Corrección por esbeltez en pilas de albañilería. In XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú, Arequipa.
- [18] ASTM C 1314 (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, ASTM: West Conshohocken, PA.
- [19] Carpinteri, A., Invernizzi, S., & Lacidogna, G. (2009). Historical brick-masonry subjected to double flat-jack test: Acoustic emissions and scale effects on cracking density. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2813-2820.
- [20] TNO DIANA (2016). DIANA user's manual, release 9.6. Netherlands.
- [21] Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction: a comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications, London, UK.
- [22] Niroumand, H., Zain, M. F. M., Jamil, M., Niroumand, S. (2013). Earth Architecture from Ancient until Today. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 89, 222-225.
- [23] Solis, R. S., Haas, J., & Creamer, W. (2001). Dating Caral, a preceramic site in the Supe Valley on the central coast of Peru. *Science*, 292(5517), 723-726.
- [24] Mendoza, R. R. (2005). *Las iglesias andinas: huellas de la cristianización y religiosidad popular*.
- [25] Giuffrè, A., & Carocci, C. (1996). Vulnerability and mitigation in historical centres in seismic areas. Criteria for the formulation of a Practice Code. In *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Elsevier Science Ltd., paper (2086).
- [26] Arce, H. (2015). Informe sobre estudio técnico del templo de la Virgen de la Asunción de Sacsamarca.
- [27] Ottazzi, G., Yep, J., Blondet, M., Villa-García, G., & Ginocchio, J. (1989). Ensayos de simulación sísmica de viviendas de adobe. *Seismic Simulation Tests of Adobe Houses*. Research Project Financed by IDRC-Canada. Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- [28] Almeida, J. A. P. P. (2012). Mechanical characterization of traditional adobe masonry elements. Doctoral dissertation. University of Minho.