

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LA MAMPOSTERÍA DE ADOBE, PIEDRA Y LADRILLO EN EDIFICACIONES HISTÓRICAS PERUANAS

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

EDWARDS JEFERSON GONZALES BERNARDO

ASESORES: Ing. DANIEL TORREALVA
 Ing. ERIKA VICENTE

Lima, junio de 2016

RESUMEN

El Perú se caracteriza por tener una gran variedad de materiales de construcción que son usados en todo el territorio de acuerdo a su disponibilidad local. Es así que se lograron construir distintas edificaciones que, con el tiempo, adquirieron un gran valor histórico y arquitectónico. Esta investigación se basa, principalmente, en los materiales y sistemas estructurales que se usaron para construir dichas estructuras; tales como adobe, piedra y ladrillo.

La información sobre las propiedades de los materiales históricos es muy escasa y más aún sobre las características mecánicas de la mampostería híbrida adobe/ladrillo, adobe/piedra, piedra/ladrillo. Estas propiedades, sin embargo son necesarias para evaluar la resistencia última de la mampostería cuando es sometida a fuerzas verticales combinadas con fuerzas sísmicas horizontales usando el criterio de falla de Mohr-Coulomb para materiales frágiles como la mampostería.

El objetivo del presente proyecto de investigación consiste en la determinación experimental de las propiedades de cohesión y ángulo de fricción de la mampostería de adobe, ladrillo y piedra. Este trabajo se dividió en 4 partes principales. La primera consistió en la recopilación de información y bibliografía.

La segunda parte comprende la recopilación de materiales correspondientes a las estructuras tipo (edificaciones históricas peruanas).

La tercera parte consiste en la implementación y aplicación de un prototipo que nos permita aplicar fuerzas verticales y horizontales en las muestras de ensayo.

Finalmente, se realizó el procesamiento y análisis de los resultados de los ensayos obteniendo un valor promedio de cohesión de 0.38 Kg/cm² y ángulo de fricción de 35° en los especímenes construidos con mortero de barro y un valor de cohesión de 1.14 Kg/cm² y ángulo de fricción de 42° en los especímenes construidos con mortero de cal.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolla en el marco del proyecto de investigación denominado “Técnicas de estabilización sísmica de edificaciones históricas de tierra en el Perú (SRP)”, que se viene llevando a cabo por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y el Instituto Getty de Conservación (GCI).

Para tal fin, es necesario conocer las características y propiedades de corte compresión en materiales, tales como: adobe, ladrillo y piedra. La literatura disponible de estos es muy escasa o corresponde a otros ensayos realizados en otros países.

Al no existir datos disponibles sobre los valores de cohesión y ángulo de fricción, se propuso obtenerlos mediante ensayos experimentales. Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú y se tratarán con mayor detalle en los siguientes capítulos.

En esta tesis se utilizó materiales originales de estructuras históricas peruanas ubicadas en la ciudad de Lima, lo que corresponde a la mampostería histórica que tiene un comportamiento diferente a la mampostería moderna.

ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	vi
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. ESTADO DEL ARTE	2
1.4. MARCO TEÒRICO: TEORÍA DE MOHR – COULOMB	3
1.5. PROPIEDADES DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN MATERIAL... 4	
2. USO DEL ADOBE, PIEDRA Y LADRILLO EN EDIFICACIONES PERUANAS ANTIGUAS	6
3. PROGRAMA DE ENSAYOS	9
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	9
3.1.1. PROTOTIPO DEL ENSAYO	10
3.2. MUESTRAS DE ENSAYOS	15
3.2.1. ESPECÍMENES DE ADOBE	15
3.2.2. ESPECÍMENES DE ADOBE – LADRILLO	17
3.2.3. ESPECÍMENES DE PIEDRA – ADOBE – PIEDRA	19
3.2.4. ESPECÍMENES DE LADRILLO – LADRILLO	21
3.2.5. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LOS ESPECÍMENES	22
3.3. CÁLCULOS	25
3.3.1. PRECOMPRESIÓN	25
3.3.2. VELOCIDAD DE CARGA DE PRECOMPRESIÓN Y CORTE	27
4. RESULTADOS	28
4.1. RESULTADOS DE COHESIÓN Y ANGULO DE FRICCIÓN	28
4.1.1. ESPECÍMENES DE ADOBE CONTEMPORANEO y ADOBE HISTÓRICO	28

4.1.2. ESPECÍMENES DE ADOBE – LADRILLO	30
4.1.3. ESPECÍMENES DE ADOBE – PIEDRA	31
4.1.4. ESPECÍMENES DE LADRILLO	33
4.1.5. COMPARATIVO GENERAL	34
4.1.6. COMPARATIVO GENERAL (GRAFICO)	35
5. DISCUSIÓN	36
6. CONCLUSIONES	37
BIBLIOGRAFÍA	39



CAPITULO 1: GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES:

El trabajo de investigación propuesto se desarrolla en el marco del proyecto denominado “Técnicas de estabilización sísmica de edificaciones históricas de tierra en el Perú” (SRP por sus siglas en inglés) desarrollado entre un convenio entre la Pontificia Universidad Católica del Perú y el Instituto Getty de Conservación de los Ángeles USA (GCI por sus siglas en inglés).

Durante la década de 1990, el GCI llevó a cabo un importante programa de investigación y ensayos llamado Proyecto Sísmico de Adobe del Getty (GSAP, por sus siglas en inglés), trabajo base sobre el cual el GCI y los expertos en este sector continúan investigando. El GSAP investigó el comportamiento de estructuras históricas de adobe típicas del sur de California, USA durante terremotos y desarrollo métodos económicamente viables de estabilización sismo-resistente y que permitieran preservar substancialmente la autenticidad de estas edificaciones. Los resultados de estas investigaciones se han difundido mediante una serie de publicaciones editadas tanto en inglés como en español.

En abril del año 2006, el GCI organizó el Coloquio GSAP en el Getty Center de Los Ángeles. Este encuentro reunió a un grupo interdisciplinario de sesenta especialistas internacionales para evaluar el impacto y eficacia de las recomendaciones de las que las guías del GSAP se habían implementado. Las conclusiones del coloquio se publicaron en el año 2009. Los participantes concluyeron que la metodología utilizada por el GSAP es fiable y efectiva, pero que su dependencia a materiales de alta tecnología y experiencia profesional ha impedido implementarla de manera mas generalizada [1].

Con el fin de abordar esta problemática, el GCI se asoció a la PUCP para constituir el Proyecto de Estabilización Sismo-resistente (SRP, por sus siglas en inglés).

A partir del trabajo realizado por el GSAP, el SRP combinará técnicas sismo-resistentes tradicionales con las de alta tecnología, para su uso en países en vías de desarrollo.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de la investigación consiste en la determinación experimental de las propiedades de cohesión y ángulo de fricción de la mampostería de adobe, ladrillo y piedra. Esto es posible porque la investigación intenta esclarecer la

relación que existe entre los componentes de un sistema estructural (en este caso mampostería histórica) y el elemento que los une (mortero); y de qué forma podrían comportarse ante la eventualidad de una carga lateral (fuerza cortante).

Como consecuencia, se pretende obtener los valores de cohesión y ángulo de fricción, que serán comparados con la literatura, y que podrán ser utilizados para modelar la mampostería histórica. Además de conseguir resultados cuantitativos, también se busca obtener resultados cualitativos que se detallarán en la investigación.

1.3. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años se vienen desarrollando investigaciones que buscan renovar el uso del adobe y mejorar las propiedades sismo-resistentes. Es así que en la actualidad se cuenta con la Norma referente al adobe el cual tiene como objetivo “proyectar edificaciones de interés social y a bajo costo que resistan las acciones sísmicas, evitando la posibilidad de colapso frágil de las mismas” [2]

Sin embargo en la norma solo se cuenta con información acerca de los siguientes esfuerzos admisibles de diseño:

- Resistencia a la compresión de la unidad y albañilería
- Resistencia a la compresión de la albañilería
- Resistencia a la compresión por aplastamiento
- Resistencia al corte de la albañilería

Pero no existe información acerca de la resistencia de corte compresión, más aun cuando existe la presencia del ladrillo o piedra junto con el adobe. A la fecha, se ha encontrado escasa información acerca de los estudios similares a la investigación:

- a). Kuwata (2004) – Iran: No muestra a detalle las pruebas experimentales realizadas para obtener el valor de la cohesión. [1]
- b). Liberatore (2006) – Italy: El valor de la cohesión y el ángulo de fricción fueron obtenidos de un ensayo a compresión diagonal asumiendo un estado de esfuerzo cortante puro. [3]
- c). Vasconcelos (2005) – Portugal: El valor de la cohesión y el ángulo de fricción fueron obtenidos a partir de ensayos a compresión diagonal según las normas de ASTM y RILEM. [1]

Cabe recalcar además que estos valores fueron obtenidos de estructuras hechas únicamente con adobe y no en estructuras híbridas de adobe con ladrillo o piedra. Esta mezcla entre el adobe y el ladrillo o el adobe y la piedra, se debe a que el adobe no puede estar en contacto directo con el suelo para evitar los problemas de humedad, es por eso que se encuentran construcciones de adobe con un sobrecimiento de ladrillo o piedra unidos mediante un mortero de barra con o sin paja ubicados en la costa y sierra del país.

1.4. MARCO TEÓRICO: TEORÍA DE MOHR - COULOMB

La Teoría de Mohr-Coulomb es un modelo matemático que describe la respuesta de los materiales frágiles a esfuerzo cortante y a tensión normal. Se puede usar en hormigón o agregados de partículas como el suelo. También se aplica a los materiales frágiles en donde la resistencia a la compresión es muy superior a la resistencia a la tracción, característico de la mampostería histórica [4].

En la investigación usaremos esta teoría para relacionar los esfuerzos de corte con la tensión normal en la mampostería, que posteriormente servirán para obtener los valores de cohesión y ángulo de fricción. La falla por corte de un material esté definido por la combinación de una tensión axial y otra tangencial, ambos relacionados de manera proporcionada, es decir, mientras mayor sea la tensión axial se necesitará mayor tensión tangencial para generar la falla por corte [5]. El modelo de este criterio, como ya se dijo, relaciona linealmente la envolvente de círculos de falla de Mohr determinando una expresión que relaciona sus estados de esfuerzos y ciertos parámetros inherentes al material (ver figura 1.1):

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c$$

Dónde:

- “ τ ” es el esfuerzo cortante
- “ σ ” es el esfuerzo normal.

- “c” es la cohesión. (punto gráfico a compresión nula ubicado en la intersección de la línea de falla con el eje de los esfuerzos cortantes): Es una medición de adherencia entre las partículas.
- ϕ es la pendiente de nuestra línea de falla, denominado ángulo de fricción interna o de rozamiento.

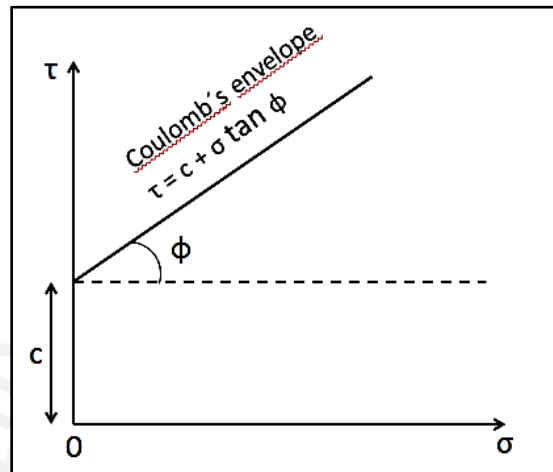


Figura 1.1 Envolvente de falla

1.5. PROPIEDADES DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN MATERIAL

Para fuerzas laterales en el plano del muro, la mampostería falla por corte. Cuando existe una carga vertical la resistencia al corte aumenta.

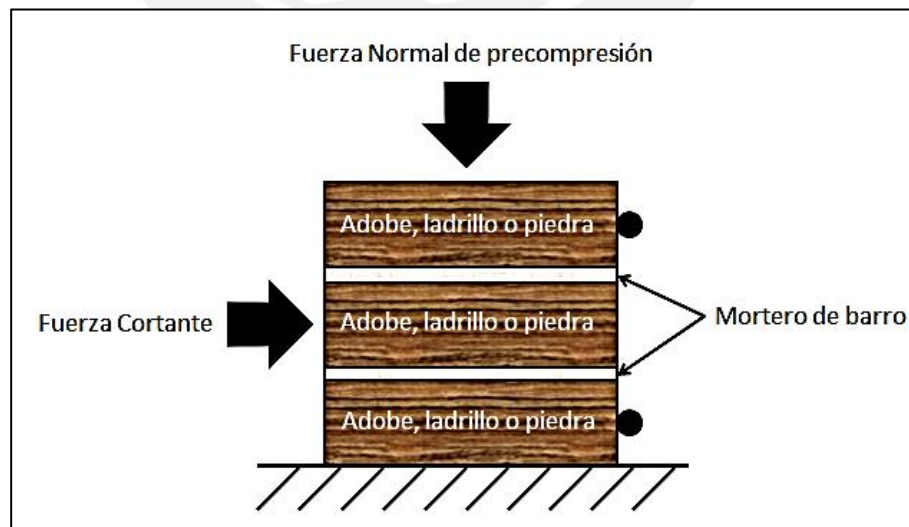


Figura 1.2. Esquema del modelo a ensayar

Al presentar estos resultados (esfuerzo axial y esfuerzo cortante) en un gráfico, se obtienen un juego de pares de puntos correspondientes a la fuerza cortante y la fuerza normal, y de estas se puede obtener una relación que nos permita determinar el ángulo de fricción interna y la cohesión.

Mientras que la cohesión se define como la fuerza de unión entre las partículas de un elemento o de un sistema. En el gráfico, es el punto teórico donde los esfuerzos de compresión son nulos y que solo se aprecia un valor de esfuerzo cortante.



CAPITULO 2: USO DEL ADOBE, PIEDRA Y LADRILLO EN EDIFICACIONES PERUANAS ANTIGUAS

Este trabajo investiga los materiales que se usaron en construcciones históricas como adobe, piedra y ladrillo. En Lima, podemos encontrar edificaciones históricas coloniales y republicanas que combinan adobe, ladrillo y piedra. Tomaremos como prototipo representativo de los sistemas y materiales constructivos a: “El Hotel el Comercio”, ubicado en el centro histórico de Lima; “La Casa Arones”, ubicada en el centro histórico del Cusco; y “La Catedral de Ica”.

El adobe consiste en barro moldeado que ha sido usado desde épocas muy tempranas (prehispánicas) hasta la actualidad. Se utilizó en paredes y muros, para conformar arcos y bóvedas. Tiene un uso extendido en el patrimonio histórico del Perú, es así que, en los edificios enumerados, observamos adobe en varios de sus muros. Sin embargo, este material es afectado por la humedad y la erosión, que junto con fisuras provocadas por el intemperismo reducen su resistencia y durabilidad, causando diversos problemas de estabilidad estructural a lo largo de los años.

La piedra, en cambio, es conocida por su durabilidad. Existen diferentes tipos de mampostería de piedra y pueden usarse con o sin mortero, tal es el caso de La Casa Arones, donde se observa el uso de la piedra en la cimentación junto con mortero de barro.

En el caso del hotel El Comercio se usa la piedra principalmente para la cimentación, junto con el mortero de cal para facilitar su trabajo en conjunto con la mampostería de ladrillo. Esto debido a la capacidad portante de este material, es eficaz para transmitir fuerzas al terreno y a su estabilidad con el tiempo.

El ladrillo es un material que también se utilizó desde épocas coloniales, se emplea generalmente en muros que necesitan un material más resistente. Se obtiene a partir de arcilla; sometidos a un proceso de secado y cocción a altas temperaturas en el horno. En nuestro estudio lo encontramos siendo participe del sobrecimiento y muros del hotel El Comercio con grandes vanos.

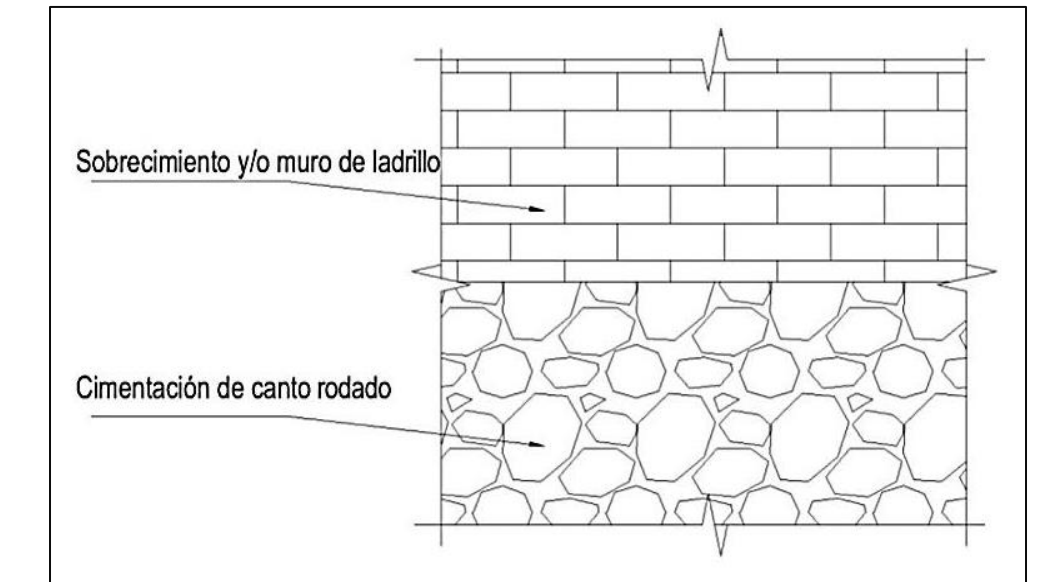


Figura 2.1. Esquema de la Cimentación y Sobrecimiento del Hotel El Comercio

En la Figura 2.1, se observa el estado actual de una zona del Hotel el Comercio en donde se puede apreciar: muros de ladrillo, adobe y quincha con una cimentación de canto rodado. Este último no forma parte de la investigación.

En la Figura 2.2, se observa una vista de la cimentación de la Casa Arones. En este caso se utilizó piedra con mortero de barro en la cimentación y adobe unido con mortero de barro como parte de un sobrecimiento.



Figura 2.2. Imagen de la Cimentación y Sobrecimiento de la Casa Arones



CAPITULO 3: PROGRAMA DE ENSAYOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

En el Perú, en la actualidad no existen ensayos que permitan involucrar fuerzas de compresión y corte aplicados gradualmente y controlados para obtener valores últimos. Por tal motivo fue necesario utilizar un prototipo adquirido de la norma británica el cual permite la determinación de la fuerza cortante en el plano horizontal.

El ensayo consiste en dos etapas: aplicación de la carga vertical (carga calculada bajo parámetros obtenidos según la norma británica) y la aplicación de una carga horizontal última (obtenido en el momento de falla del espécimen).

Estas cargas fueron aplicadas gradualmente a través de dos gatas hidráulicas a una velocidad calculada de 20 Kg/seg. Fue necesario utilizar una plancha de neopreno y un taco de madera en la superficie superior e inferior del espécimen para distribuir la carga en toda el área de contacto.

El espécimen consiste en 3 bloques de mampostería (adobe, ladrillo, piedra) unidos verticalmente a través de un mortero (barro o cal), dos de estos bloques se encuentran estáticos horizontal y verticalmente, y un bloque que recibirá la carga lateral el cual se trasladará horizontalmente posteriormente a la falla del mortero. La restricción de estos elementos se logró utilizando topes metálicos, mientras que para medir el desplazamiento horizontal del espécimen se utilizó LVDTs el cual permite señalar el momento de falla del elemento.

Finalmente, se obtiene la carga vertical (carga detenida y estable calculada a través de los parámetros obtenidos de la norma británica) y la carga horizontal (obtenida al momento de la falla del espécimen). Posteriormente, este juego de pares obtenidos es representado en un gráfico para cada tipo de espécimen, obteniendo una regresión lineal muy semejante al Círculo de Mohr. Permittiéndonos calcular los valores de cohesión y ángulo de fricción.

3.1.1. PROTOTIPO DEL ENSAYO:

El diseño del prototipo utilizado se obtuvo de la norma británica para ensayos de mampostería, “*Methods of test formasonry – Part 3: Determination of initial shear strength*” [6]:

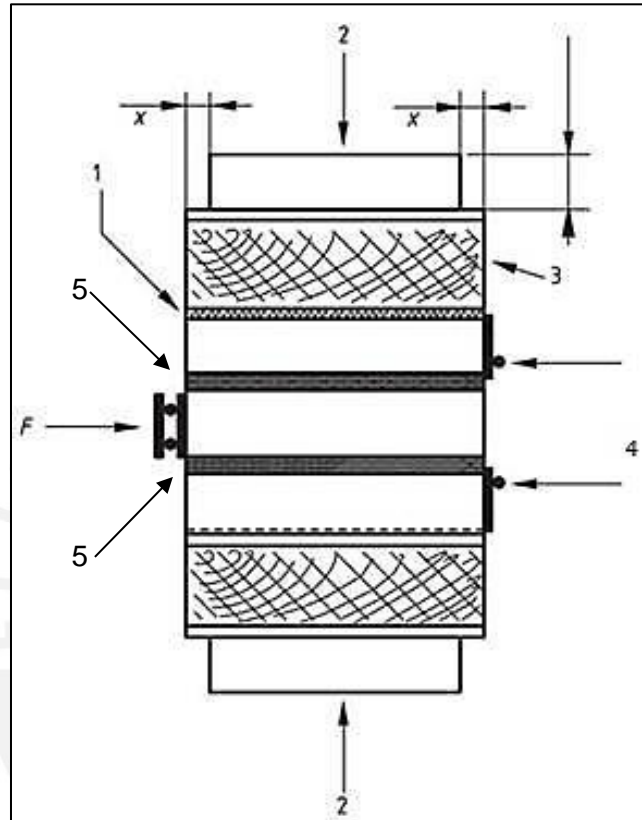


Figura 3.1. Esquema de ensayos [7]

Datos del prototipo:

- 1: Neopreno.
- 2: Precompresión.
- 3: Apoyo: Compuesto de madera.
- 4: Topes: Para evitar que falle por corte diagonal.
- 5: Mortero de la mampostería
- F: Fuerza Cortante.

Interacción de fuerzas:

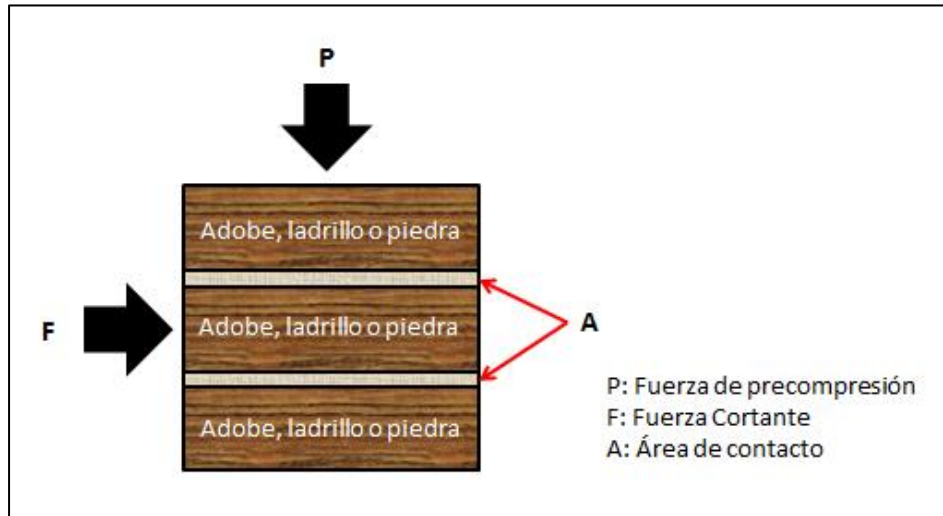


Figura 3.2. Distribución de fuerzas externas

$$\sigma = P \div A$$

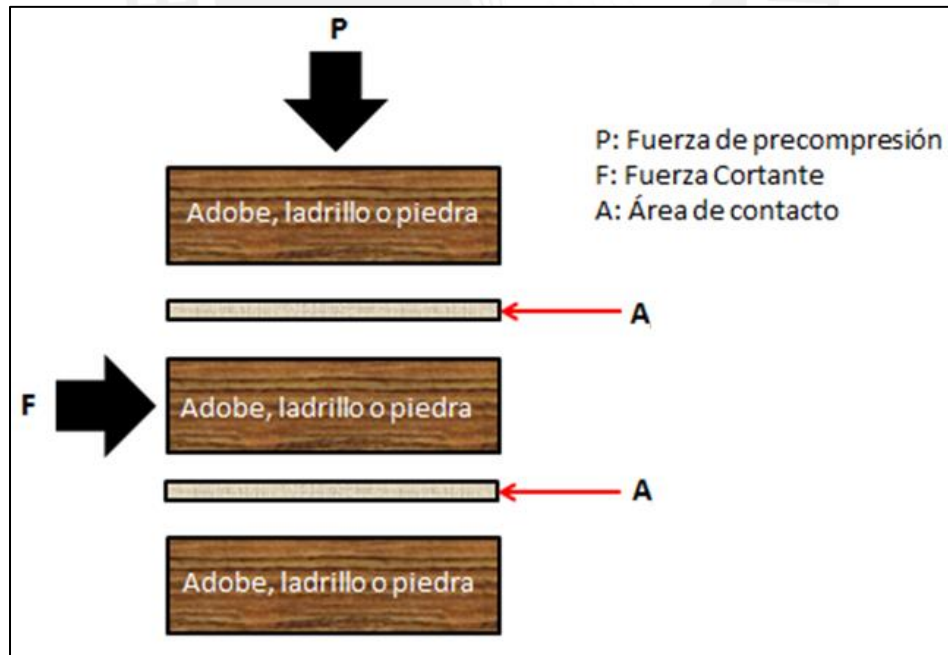


Figura 3.3. Distribución de fuerzas internas

$$\tau = F \div 2A$$

DISPOSITIVO DE ENSAYOS:

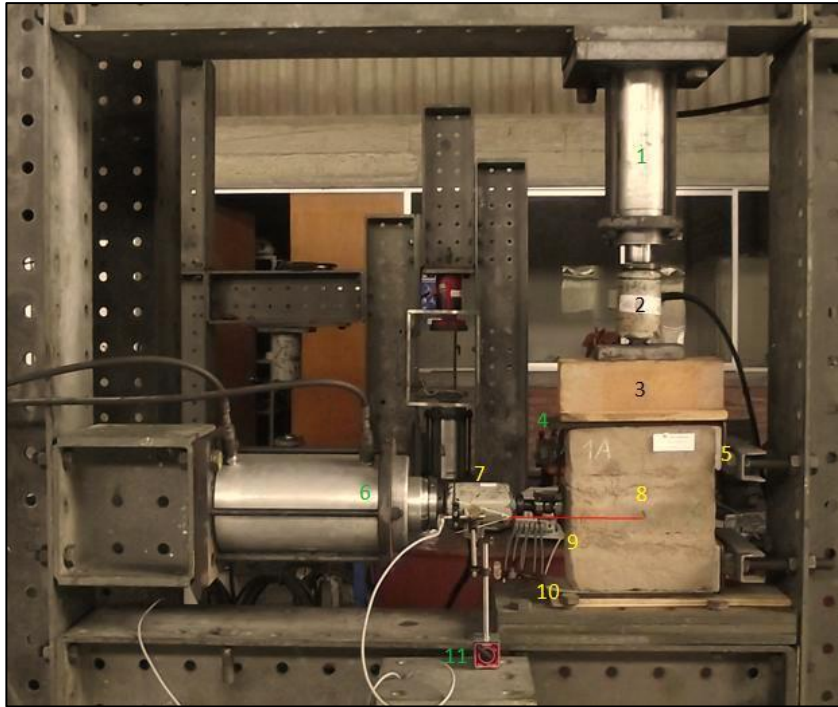


Figura 3.4. Dispositivo de ensayos

Datos del dispositivo:

- 1, 2: Gata hidráulica, encargada de proveer la fuerza axial de Precompresión.
- 3: Apoyo - taco de madera.
- 4: Neopreno
- 5: Topes metálicos.
- 6, 7: Elementos del prototipo encargados de generar la fuerza cortante.
- 8: Espécimen según el tipo de pila (bloque y mortero)
- 9: LVDT: Instrumentos que sirven para medir los desplazamientos máximos.
- 10: Planchas metálicas: Se utilizó para mantener la base (superior e inferior) en horizontal de modo que la carga vertical fuera aplicada se encuentre distribuida en toda la superficie.
- 11: Elemento que sirve de referencia para el LVDT.

- ✓ Velocidad de Carga: La velocidad de carga recomendada se obtuvo según la norma británica para ensayos de mampostería: “*Methods of test for masonry – Part 3: Determination of initial shear strength*” [6]. La norma indica una velocidad de carga cortante que varía entre $0.1(\text{N/mm}^2)/\text{min}$ y $0.4(\text{N/mm}^2)/\text{min}$ equivalente a 390 Kg/min y 1560 Kg/min respectivamente en un elemento de $13 \times 30 \text{ cm}^2$.
- ✓ Colocación del espécimen en el dispositivo: En las imágenes siguientes se observa la colocación e instalación de los especímenes en el dispositivo:



Figura 3.5. Colocación del espécimen.



Figura 3.6. Posicionamiento del espécimen.



Figura 3.7. Ubicación de la aplicación de carga vertical.



Figura 3.8. Ajuste del Apoyo (Topes).

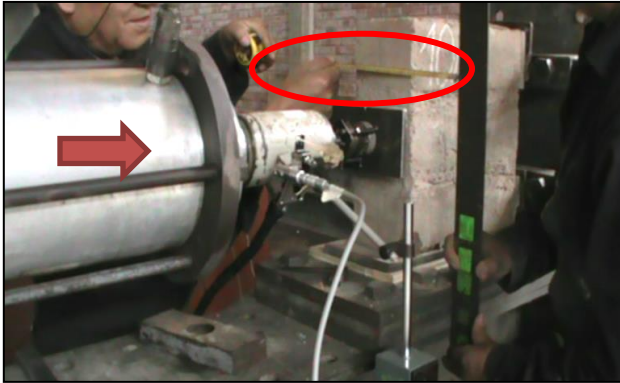


Figura 3.9. Verificar distancia entre espécimen y punto de referencia.

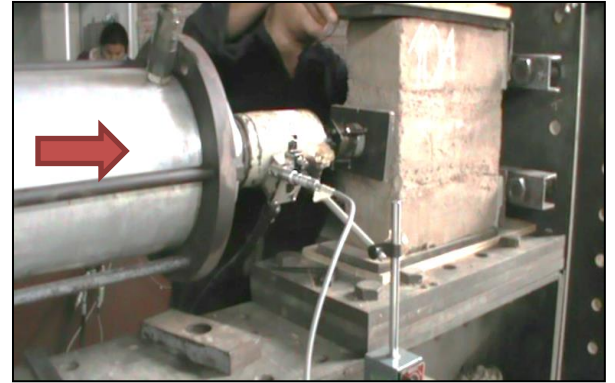


Figura 3.10. Colocación de neopreno y apoyo de madera.



Figura 3.11. Colocación de la gata para carga de Precompresión.



Figura 3.12. Ajuste de la gata de precompresión.

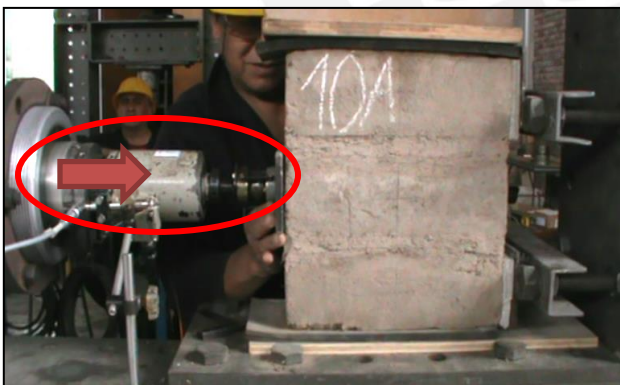


Figura 3.13. Ajuste de la gata de Fuerza Cortante.

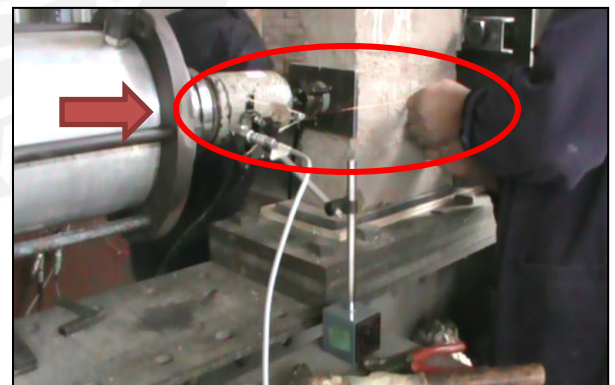


Figura 3.14. Colocación del LVDT



Figura 3.15. Imagen Local del dispositivo.



Figura 3.16. Imagen global del Dispositivo.

3.2. MUESTRAS DE ENSAYOS

3.2.1. ESPECÍMENES DE ADOBE:

En el ensayo se utilizaron dos tipos de adobes:

- Adobes contemporáneos
- Adobes históricos procedentes de la Catedral de Ica.

Adobe Contemporáneo:

- L = 30 cm
- B = 13 cm
- h = 10 cm

Espécimen Adobe

Contemporáneo:

- L = 30 cm
- B = 13 cm
- h_t = 34 cm

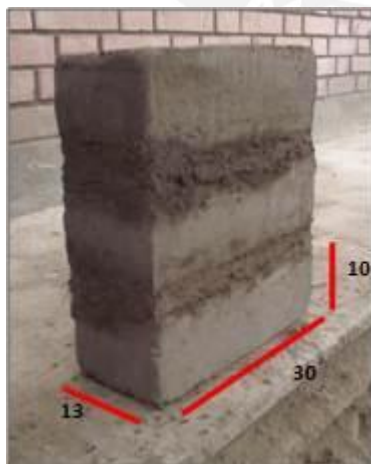


Figura 3.17. Dimensiones del Adobe



Figura 3.18. Dimensiones del Espécimen

Se construyeron 12 especímenes utilizando adobe contemporáneo con las características indicadas en las Figuras 3.17 y 3.18. En la construcción de las pilas se tuvo en cuenta las recomendaciones constructivas adquiridas en investigaciones pasadas, fuente: “RESISTENCIA SÍSMICA DE LA MAMPOSTERÍA DE ADOBE” [7]: Ing. Julio Vargas Neumman, Ing. Juan Bariola Bernal, Ing. Marcial Blondet., resumidos a continuación:

- ✓ En la construcción de las pilas se utilizó paja en el mortero con la siguiente proporción volumétrica: 1:3:1 (arena, tierra y paja); (aplicada en los tres tipos de especímenes) ya que al “añadir este agregado, aumenta la demanda de agua de barro para poder obtener una trabajabilidad adecuada. Por ello la cantidad óptima de paja añadido fue controlada por la trabajabilidad del barro usado en la fabricación del mortero”.
- ✓ Se mojaron los bloques antes del asentado, aproximadamente 1cm de agua en las dos caras de asiento
- ✓ Se utilizaron bloques que contenían la menor humedad posible para disminuir la avidez por el agua del mortero. Cabe mencionar que los bloques contemporáneos tenían más de 1 año de secado a la intemperie.



Figura 3.19. Pilas de Adobe

Respecto a los adobes de Ica, estos fueron obtenidos de zonas colapsadas de la Catedral de dicha localidad, para los efectos del presente trabajo, éstos se reconocerán como adobes Históricos. En la fabricación de estas pilas de adobe (figura 3.20), el mortero se preparó sin el uso de paja ya que

los adobes tampoco contaban con este agregado. Los adobes tenían una altura de 7cm aproximadamente.

Adobe histórico:

- L = 20 cm
- B = 15 cm
- h = 7 cm

Espécimen Adobe histórico:

- L = 20 cm
- B = 15 cm
- h_t = 25 cm



Figura 3.20. Pilas de Adobe Histórico

3.2.2. ESPECÍMENES DE ADOBE - LADRILLO:

Los ladrillos fueron extraídos de un muro histórico del Hotel El Comercio. (Ver Figuras 3.21 y 3.22).



Figura 3.21. Columneta del Hotel el Comercio.



Figura 3.22. Extracción de bloques de ladrillo

En el Laboratorio, se procedió a limpiar cada bloque de ladrillos extraídos que posteriormente, se seleccionaron los ladrillos con dimensiones similares entre sí. La fabricación de los especímenes se utilizó 2 cm de espesor de mortero de barro con paja.

Espécimen Adobe – Ladrillo – Adobe:

- L = 26 cm
- B = 13 cm
- h = 29 cm

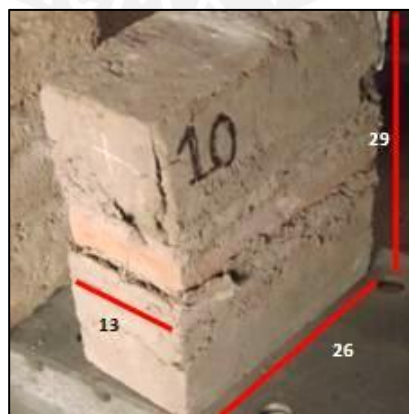


Figura 3.23. Dimensiones del Espécimen

En la construcción de los especímenes de Adobe – Ladrillo se utilizó 24 bloques de adobe y 12 ladrillos con las características indicadas líneas arriba. (Ver Figura 3.23).

3.2.3. ESPECÍMENES DE PIEDRA- ADOBE – PIEDRA:

Las piedras fueron extraídas del Hotel El Comercio. Las cuales fueron cortadas en el Laboratorio de Rocas de la Facultad de Ingeniería de Minas, con el fin de lograr unidades más regulares que sirvan para el ensayo. El área de contacto entre el adobe y la piedra es de 30cm x 13cm (ver figuras 28 y 29); sin embargo, la altura de las piedras no pudo ser modificada, por ello esta dimensión varía en su mayoría.

Durante la elaboración de las pilas, se buscó que tuvieran altura similar para evitar posibles dispersiones en los resultados y facilitar la colocación del espécimen en el prototipo.

En el caso de las dimensiones de los adobes utilizados en este espécimen, no se modificó ningún adobe y se consideró la misma dimensión utilizada para las pilas de adobe contemporáneo. Para la junta de los especímenes se utilizó mortero de barro con paja de 2 cm de espesor.



Figura 3.24. Piedras obtenidas del
Hotel el Comercio



Figura 3.25. Piedras cortadas.



Figura 3.26. Dimensiones de los especímenes de Adobe- Piedra - Adobe



Figura 3.27. Dimensiones de los especímenes de Adobe - Piedra - Adobe

Tabla 3.1. Dimensión de las Pilas de Piedra - Adobe - Piedra.

Espécimen	Ls (cm)	Li (cm)	Bs (cm)	Bi (cm)	H (cm)
1	36	38	13.4	13.2	38.7
2	33	32	12.5	13.5	38
3	30	33	13	13.3	40.8
4	31	33	13.4	12.8	40.4
5	33	34	13	14	41.5
6	30	37	14	14	42.4
7	32	32	13.3	16	42
8	30	28.5	14	13	39

Dónde:

- Ls= Longitud Superior.
- Li = Longitud Inferior.
- Bs= Base Superior.
- Bi= Base Inferior.
- H = Altura total del espécimen.

En la construcción de los especímenes de piedra – adobe – piedra se utilizaron 22 bloques de piedra y 11 adobes con las características señaladas

en las Figuras 3.26 y 3.27 (Ver detalle en la Tabla 3.1). Para lograr que la carga se distribuya a lo largo del espécimen, se tuvo que nivelar el área de contacto con capping en la superficie superior e inferior.



Figura 3.28. Piedra nivelada con capping

3.2.4. ESPECIMENES DE LADRILLO - LADRILLO

En la construcción de estos especímenes se utilizó mortero de cal hidráulica de 2 cm. El procedimiento constructivo es similar a la construcción de los modelos anteriores; sin embargo, se tuvo que adicionar, al igual que los especímenes tipo Piedra – Adobe, capping” en la superficie superior e inferior para que las muestras se encuentren horizontales como es requerido por la norma del ensayo.



Figura 3.29. Especímen Pila de ladrillo con mortero de cal

3.2.5. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LOS ESPECIMENES

El procedimiento constructivo de los especímenes fue similar en todos los casos detallados a continuación [8]:

- **Zarandeo de la tierra y la preparación del mortero:** La tierra utilizada se zarandó utilizando una malla #8 para eliminar las piedras mayores de 5 mm y las impurezas que el suelo utilizado pudiera contener (Ver Figura 3.30).



Figura 3.30. Zarandeo del suelo

En la preparación del mortero de todos los especímenes, excepto los adobes históricos, se usó la siguiente proporción volumétrica: 1:3:1 (arena, tierra y paja); la paja se utilizó para controlar la propagación de las fisuras. La paja que se utilizó fue césped corriente seco de aproximadamente 5cm de longitud.



Figura 3.31. Preparación de Mortero

- **Construcción de los especímenes:** Preparado el mortero, el procedimiento de construcción de los especímenes es similar en todos los diseños.

El procedimiento constructivo [9] se detalla a continuación:

- Paso 1: Se presenta los bloques para ver que calcen correctamente (Ver Figura 3.32).
- Paso 2: Se coloca el mortero encima del adobe, cubriendo el área en su totalidad, que irá en la base previamente humedecido para que exista adherencia entre ambos.
- Paso 3: Se coloca el ladrillo encima del mortero (Ver Figura 3.33).
- Paso 4: Se verifica la plomada y el nivel (Ver Figura 3.34 y 3.35).
- Paso 5: Se coloca el mortero sobre el ladrillo cubriendo toda el área.
- Paso 6: Se humedece el adobe y se coloca sobre el ladrillo.
- Paso 7: Se verifica la plomada y el nivel en todo el espécimen construido (Ver Figura 3.36).



Figura 3.32. Modelo de la Pila



Figura 3.33. Construcción de la pila



Figura 3.34. Verificación de la plomada



Figura 3.35. Verificación del nivel



Figura 3.36. Verificación del nivel

3.3. CÁLCULOS

3.3.1. PRECOMPRESIÓN:

Para obtener la magnitud de las cargas utilizadas durante el ensayo se realizó un cálculo de esfuerzos, posteriormente se verificó que éste cumpliera con la norma británica para ensayos de mampostería [6]. Cabe mencionar que la norma indicada se utiliza para ensayos de corte-compresión en especímenes de ladrillo. Sin embargo, también nos sirve de referencia para poder establecer los parámetros de nuestros ensayos con adobe y piedra.

Para obtener el esfuerzo, se consideró las condiciones más desfavorables, es decir se tomó como referencia las casonas de la ciudad de Cusco con 3 pisos de adobe; sin embargo las estructuras representativas en el alcance de la investigación tales como el caso del Hotel el Comercio se encuentra construido el 1er piso de adobe y el 2do y 3er Piso de Quincha generando resultados de carga mucho menor al obtenido.

Cálculo de esfuerzos para un bloque de adobe:

Datos asumidos:

Peso específico del material	$\lambda = 1800 \text{ Kg/m}^3$
Altura típica considerada para el metrado	$H = 18 \text{ m}$
Largo del espécimen	$L = 0.30 \text{ m}$
Ancho del espécimen	$B = 0.13 \text{ m}$
Área de adobe	$A = 0.039 \text{ m}^2$

El esfuerzo de compresión para un bloque de adobe, se calcula de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{1800 * 18 * .3 * .13}{0.039} = 32400 \text{ kg/m}^2 = 3.24 \text{ kg/cm}^2$$

La norma utilizada, especifica un límite para el cálculo de las Precompresiones de: 10N/mm² (equivalente a 101.9 Kg/cm²)

Al no sobrepasar el límite, la norma recomienda utilizar las siguientes cargas de precompresión: 0.1N/mm², 0.3N/mm² y 0.5N/mm² que equivale a utilizar 397Kg, 1192Kg y 1987Kg respectivamente para nuestros especímenes de adobe.

Finalmente, las cargas de precompresión (Ton) utilizadas durante el ensayo fueron las siguientes dependiendo de cada espécimen (Ver tabla 3.2):

Tabla 3.2 Cargas de Precompresión

Espécimen	ADOBE CONTEMPORANEO	ADOBE HISTORICO	ADOBE - LADRILLO	PIEDRA – ADOBE	LADRILLO
1	200 Kg	200 Kg	400 Kg	200 Kg	400 Kg
2	200 Kg	400 Kg	400 Kg	200 Kg	500 Kg
3	200 Kg	800 Kg	400 Kg	200 Kg	400 Kg
4	400 Kg	-	800 Kg	400 Kg	1000 Kg
5	400 Kg	-	800 Kg	400 Kg	1300 Kg
6	400 Kg	-	800 Kg	400 Kg	2000 Kg
7	800 Kg	-	1500 Kg	800 Kg	2000 Kg
8	800 Kg	-	1500 Kg	800 Kg	2000 Kg
9	800 Kg	-	1500 Kg	2500 Kg*	-
10	1500 Kg	-	2000 Kg*	1500 Kg*	-
11	1500 Kg	-	2000 Kg*	2000 Kg*	-
12	1500 Kg	-	2500 Kg*	-	-

*Alguno de los valores en rojo no fueron utilizados debido a que el espécimen fallo durante la aplicación de la carga de compresión. De igual forma, los otros valores no se tomaron en cuenta debido a que se encontraban muy alejados de la línea de tendencia obtenida.

3.3.2. VELOCIDAD DE CARGA DE PRECOMPRESIÓN Y CORTE:

La velocidad de carga recomendada por la norma británica [6] varía desde 0.1 N/(mm²/min) hasta 0.4N/(mm²/min). Los cuales equivalen a 6.5kg/s y 26 kg/s respectivamente. Para efectos prácticos del ensayo se usó una velocidad de carga promedio de 20kg/s en ambos casos: corte y precompresión.



CAPITULO 4: RESULTADOS

A continuación se muestra los valores obtenidos de los especímenes según el tipo de mampostería utilizada.

4.1. RESULTADOS DE COHESIÓN Y ANGULO DE FRICCIÓN

4.1.1. ESPECÍMENES DE ADOBE CONTEMPORANEO y ADOBE HISTÓRICO:

En la tabla 4.1 se muestra los valores obtenidos de esfuerzo de compresión y esfuerzo de corte según la cantidad de especímenes ensayados: 12 especímenes de adobe contemporáneo y 3 especímenes de adobe de Ica. De igual forma se indica el área de cada espécimen.

Tabla 4.1. Resultados de Esfuerzo de Compresión y Corte en especímenes de Adobe Contemporáneo y Adobe Histórico.

TIPO DE ADOBE	ESPECIMEN N°	Área	Precompresión	Fuerza máxima de Corte	Esfuerzo Compresión	Esfuerzo Corte
		mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
Contemporáneo	1	39,000	2,469	6,720	0.0633	0.0862
Contemporáneo	2	39,000	2,028	5,220	0.0520	0.0669
Contemporáneo	3	39,000	2,113	5,262	0.0542	0.0675
Contemporáneo	4	39,000	4,056	9,521	0.1040	0.1221
Contemporáneo	5	39,000	4,098	9,230	0.1051	0.1183
Contemporáneo	6	39,000	4,060	8,008	0.1041	0.1027
Contemporáneo	7	39,000	8,010	13,660	0.2054	0.1751
Contemporáneo	8	39,000	8,243	14,030	0.2114	0.1799
Contemporáneo	9	39,000	8,048	13,259	0.2063	0.1700
Contemporáneo	10	39,000	14,928	23,197	0.3828	0.2974
Contemporáneo	11	39,000	15,418	23,665	0.3953	0.3034
Contemporáneo	12	39,000	15,140	24,034	0.3882	0.3081
Histórico	13	30,000	2,207	4,948	0.0736	0.0825
Histórico	14	30,000	4,107	7,297	0.1369	0.1216
Histórico	15	30,000	8,233	11,553	0.2744	0.1926

En la figura 4.1 se muestra los pares de puntos obtenidos del ensayo de compresión - corte y la diferencia existente entre los especímenes fabricados con mampostería de adobe contemporáneo (moderno) y adobe histórico (catedral de Ica).

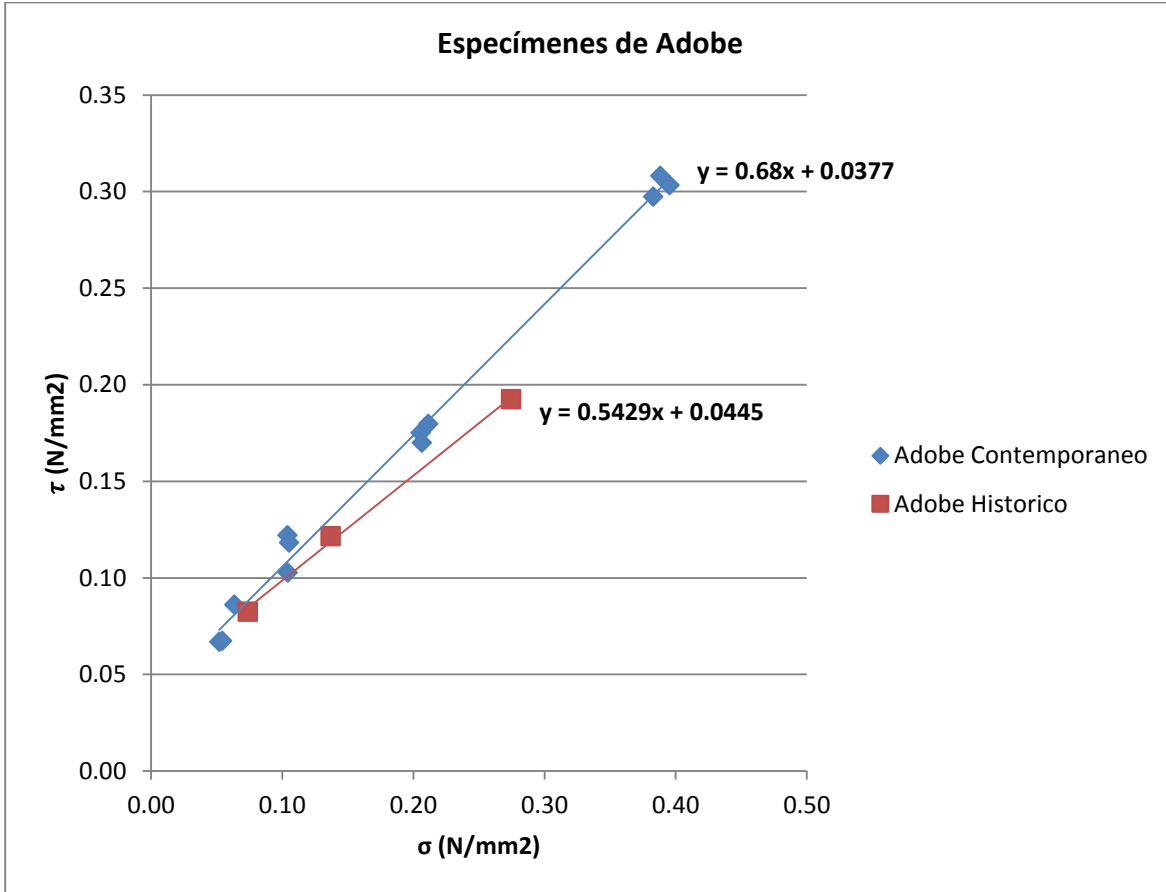


Figura 4.1. Grafico Esfuerzo Compresión (eje horizontal) vs Esfuerzo de Corte en Especímenes de Adobe.

En la tabla 4.2 se muestra el resumen de resultados obtenidos en los ensayos utilizando la mampostería de adobe contemporáneo e histórico.

Tabla 4.2 Resultados de Cohesión y Ángulo de Fricción, Adobe Contemporáneo.

	Cohesión (N/mm ²)	Cohesión (Kg/cm ²)	Ángulo de fricción (rad)	Ángulo de fricción (°)
Adobe contemporáneo	0.038	0.38	0.60	34.2
Adobe histórico	0.045	0.45	0.50	28.5

4.1.2. ESPECÍMENES DE ADOBE – LADRILLO:

En la tabla 4.3 se muestra los valores obtenidos de esfuerzo de compresión y esfuerzo de corte según la cantidad de especímenes ensayados: 12 especímenes de adobe – ladrillo. De igual forma se indica el área de cada espécimen.

* Algunos valores indicados no fueron considerados debido a tener una mayor dispersión respecto a la línea de tendencia, mientras que otros no se consideraron debido a que el espécimen falló en la etapa de precompresión.

Tabla 4.3. Resultados de Esfuerzo de Compresión y Corte en especímenes de Adobe-Ladrillo.

ESPECIMEN N°	Área	Precompresión	Fuerza máxima de Corte	Esfuerzo Compresión	Esfuerzo Corte
	mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	33,800	4,042.25	8,557.02	0.1196	0.1266
2	33,800	4,177.55	8,620.63	0.1236	0.1275
3	33,800	4,187.86	7,434.90	0.1239	0.1100
4	33,800	8,062.64	12,120.55	0.2385	0.1793
5	33,800	8,200.97	11,375.16	0.2426	0.1683
6	33,800	8,112.78	13,630.09	0.2400	0.2016
7	33,800	15,089.25	22,425.22	0.4464	0.3317
8	33,800	15,749.58	23,147.60	0.4660	0.3424
9	33,800	15,460.60	23,573.43	0.4574	0.3487
10*	33,800	20,142.42	26,451.17	0.5959	0.3913
11*	33,800	20,851.70	31,995.80	0.6169	0.4733
12*	33,800	24,776.99	33,757.27	0.7330	0.4994

En la figura 4.2 se muestra los pares de puntos obtenidos del ensayo de compresión - corte de especímenes construidos con adobe y ladrillo:

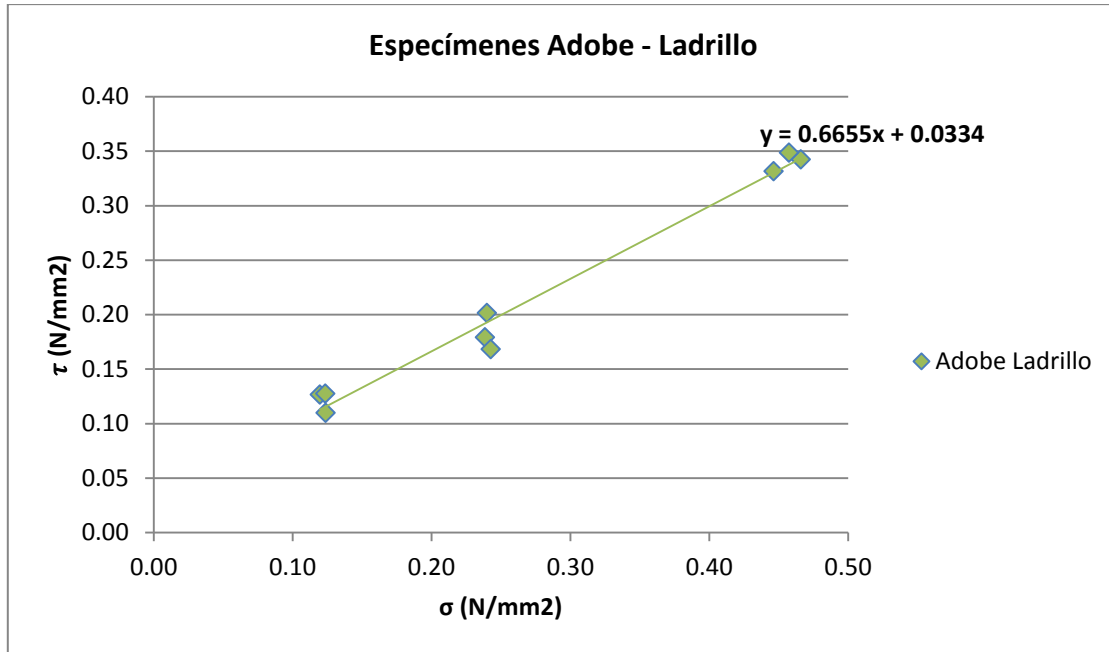


Figura 4.2. Grafico Esfuerzo Compresión (horizontal) vs Esfuerzo de Corte en Adobe-Ladrillo.

En la tabla 4.4 se muestra el resumen de resultados obtenidos en los ensayos de compresión – corte utilizando la mampostería de adobe - ladrillo.

Tabla 4.4. Resultados de Cohesión y Angulo de Fricción, Adobe-Ladrillo.

	Cohesión (N/mm ²)	Cohesión (Kg/cm ²)	Ángulo de fricción (rad)	Ángulo de fricción (°)
Adobe Ladrillo	0.033	0.33	0.59	33.6

4.1.3. ESPECÍMENES DE ADOBE – PIEDRA:

En la tabla 4.5 se muestra los valores obtenidos de esfuerzo de compresión y esfuerzo de corte según la cantidad de especímenes ensayados: 11 especímenes de adobe – piedra. De igual forma se indica el área de cada espécimen.

*Algunos valores indicados no fueron considerados debido a tener una mayor dispersión respecto a la línea de tendencia, mientras que otros no se consideraron debido a que el espécimen falló en la etapa de precompresión.

Tabla 4.5. Resultados de Esfuerzo de Compresión y Corte en especímenes de Adobe-Piedra.

ESPECIMEN N°	Área	Precompresión	Fuerza máxima de Corte	Esfuerzo Compresión	Esfuerzo Corte
	mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	48,240	2,130.63	5,730.19	0.0442	0.0594
2	41,250	2,122.10	6,655.05	0.0514	0.0807
3	39,000	2,027.19	5,699.60	0.0520	0.0731
4	41,540	3,951.79	9,568.74	0.0951	0.1152
5	42,900	4,069.78	10,134.67	0.0949	0.1181
6	42,000	4,111.39	9,525.47	0.0979	0.1134
7	42,560	8,070.98	14,491.25	0.1896	0.1702
8	42,000	7,993.91	15,112.34	0.1903	0.1799
9*	35,746	25,164.56	28,805.59	0.7040	0.4029
10*	38,400	15,118.24	24,172.77	0.3937	0.3147
11*	48,240	20,088.09	24,600.33	0.0442	0.0594

En la figura 4.3 se muestra los pares de puntos obtenidos del ensayo de compresión - corte de especímenes construidos con adobe y piedra:

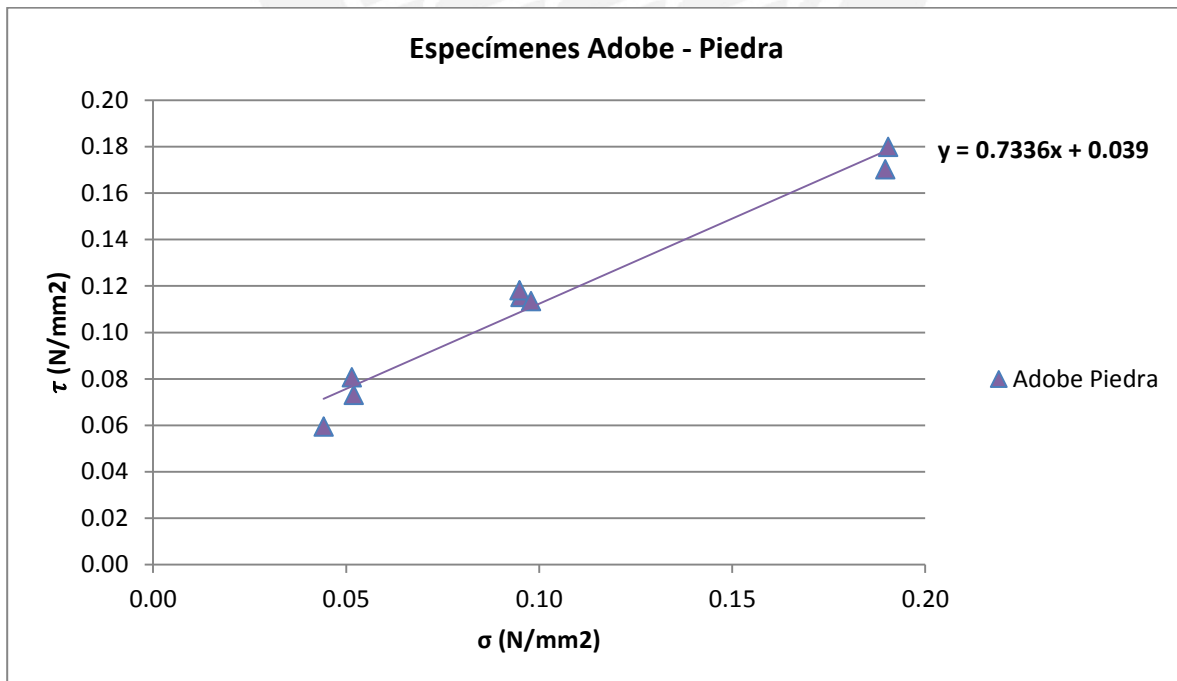


Figura 4.3. Grafico Esfuerzo Compresión (horizontal) vs Esfuerzo de Corte en Adobe-Piedra.

En la tabla 4.6 se muestra el resumen de resultados obtenidos en los ensayos de compresión - corte utilizando la mampostería de adobe - piedra.

Tabla 4.6. Resultados de Cohesión y Angulo de Fricción, Adobe-Piedra.

	Cohesión (N/mm ²)	Cohesión (Kg/cm ²)	Ángulo de fricción (rad)	Ángulo de fricción (°)
Adobe Piedra	0.039	0.39	0.63	36.3

4.1.4. ESPECÍMENES DE LADRILLO:

En la tabla 4.7 se muestra los valores obtenidos de esfuerzo de compresión y esfuerzo de corte según la cantidad de especímenes ensayados: 8 especímenes de ladrillo. De igual forma se indica el área de cada espécimen.

Tabla 4.7. Resultados de Esfuerzo de Compresión y Corte en especímenes de Ladrillo.

ESPECIMEN N°	Área	Precompresión	Fuerza máxima de Corte	Esfuerzo Compresión	Esfuerzo Corte
	mm ²	N	N	N/mm ²	N/mm ²
1	33800	3,655.18	14,936.46	0.1081	0.2210
2	33800	4,972.34	18,470.29	0.1471	0.2732
3	33800	3,957.84	14,717.50	0.1171	0.2177
4	33800	9,551.33	24,356.46	0.2826	0.3603
5	33800	13,387.47	29,382.01	0.3961	0.4346
6	33800	18,668.33	41,895.73	0.5523	0.6198
7	33800	18,966.59	46,076.93	0.5611	0.6816
8	33800	19,742.71	43,383.46	0.5841	0.6418

En la figura 4.4 se muestra los pares de puntos obtenidos del ensayo de compresión - corte de especímenes construidos con ladrillo y mortero de cal:

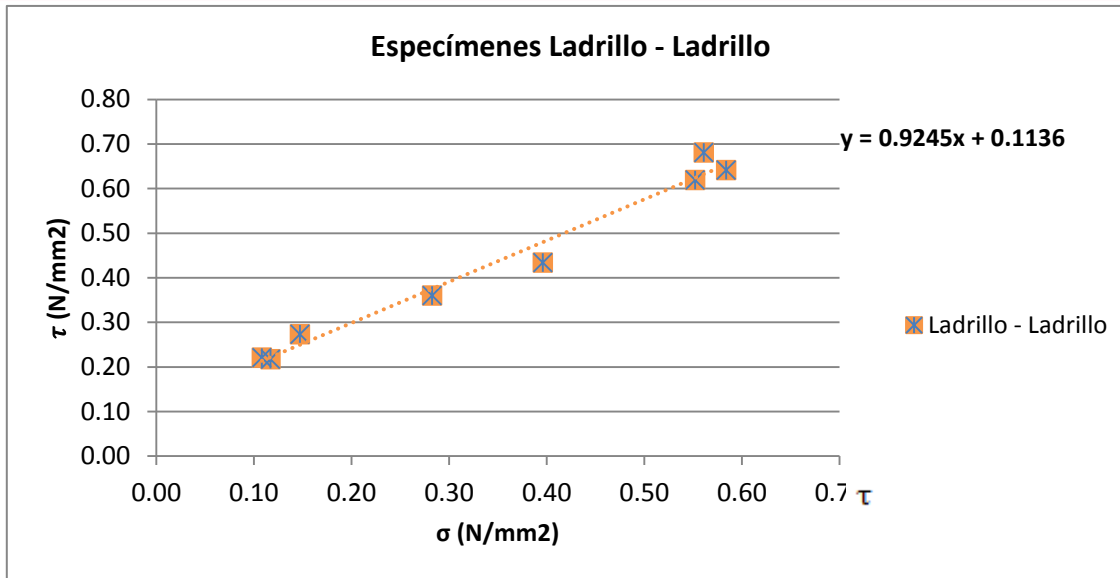


Figura 4.4. Grafico Esfuerzo Compresión (horizontal) vs Esfuerzo de Corte en Adobe-Ladrillo.

En la tabla 4.8 se muestra el resumen de resultados obtenidos en los ensayos de compresión - corte utilizando la mampostería de ladrillo y mortero de cal:

Tabla 4.8. Resultados de Cohesión y Ángulo de Fricción, Ladrillo-Ladrillo.

	Cohesión (N/mm ²)	Cohesión (Kg/cm ²)	Ángulo de fricción (rad)	Ángulo de fricción (°)
Ladrillo - Ladrillo	0.1136	1.136	0.75	42.753

4.1.5. COMPARATIVO GENERAL

En la tabla 4.9 se muestra el resumen de resultados obtenidos en todos los ensayos de compresión - corte de la investigación:

Tabla 4.9 Comparativo General

	Adobe Contemporáneo	Adobe Histórico	Adobe – Ladrillo	Adobe – Piedra	Ladrillo
Cohesión (Kg/cm ²)	0.38	0.45	0.33	0.40	1.14
Ángulo de Fricción (°)	34.2	28.5	33.6	36.3	42.8

4.1.6. COMPARATIVO GENERAL (GRAFICO):

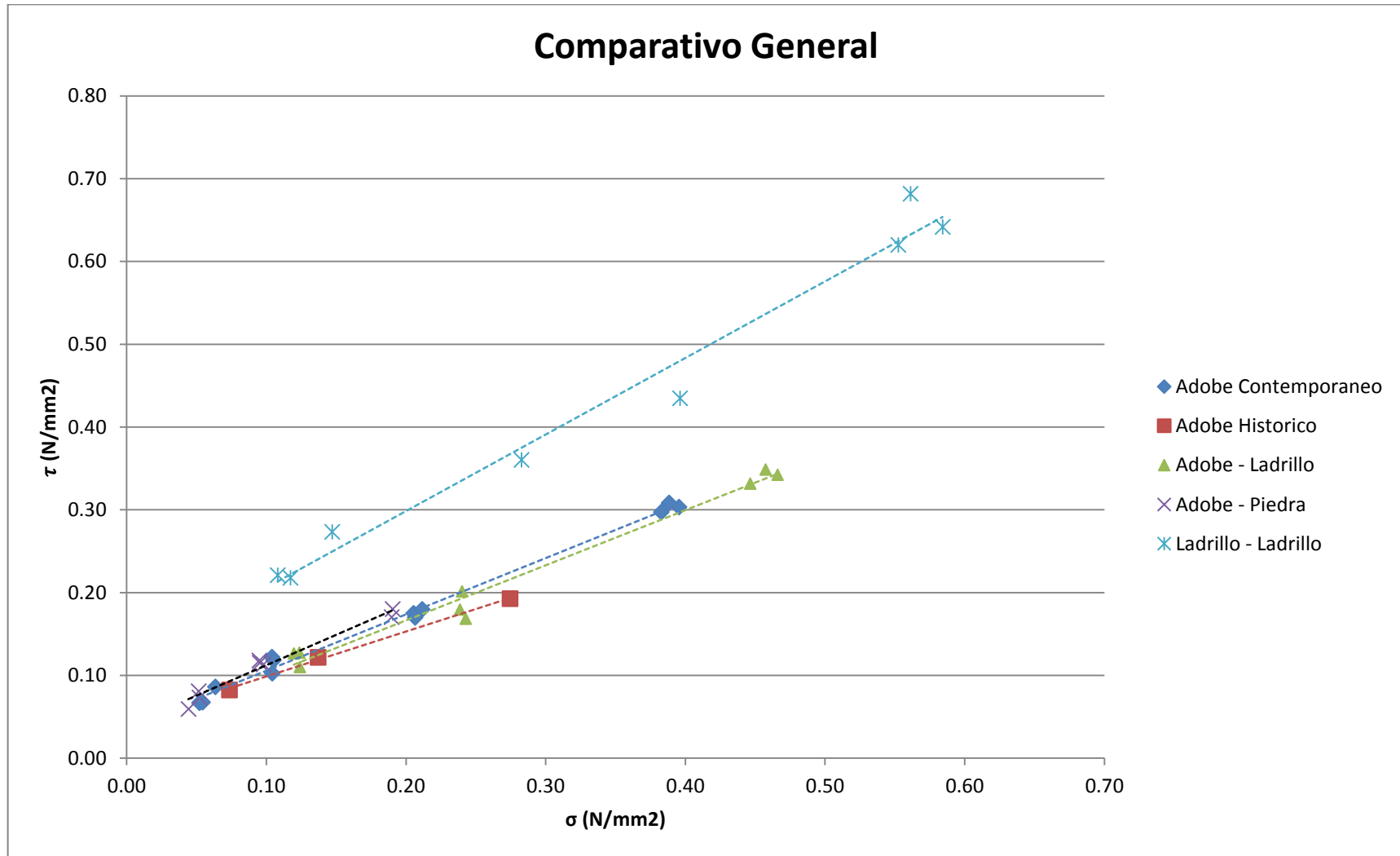


Figura 4.5. Comparativo General

En la figura 4.5 se muestra el comparativo general de los resultados obtenidos.

CAPITULO 5: DISCUSIÓN

- Durante el proceso de recopilación de información, se pudo obtener datos acerca de los valores de cohesión en la mampostería de adobe, ladrillo y piedra; sin embargo, los especímenes elaborados en la investigación son mixtos. Sin embargo, Vale mencionar que a pesar de la diferencia en la investigación, los valores obtenidos son similares en el caso de los especímenes de Adobe vs la mampostería de adobe (Tabla 5.1):

Tabla 5.1: Cuadro comparativo de investigaciones

Fuente	Tipo de muestra	Cohesión "c"	Comentarios
		Kg/cm ²	
Resultado obtenido	Espécimen de Adobe	0.38	Ensayo: Compresión - Cortante
Kuwata (2005) – Irán [1]	Mampostería de Adobe	0.50	No presenta detalles acerca del ensayo utilizado
Liberatore (2006) – Italia [3]	Mampostería de Adobe	0.66	Ensayo de compresión diagonal (in situ)

- A pesar de la cercanía en los resultados obtenidos entre la investigación actual vs Liberatore (2006) – Italia [3], estos valores no pueden ser comparados ya que se trata de distintos ensayos.

CAPITULO 6: CONCLUSIONES

- En los edificios prototipo elegidos, para todos los tipos de mampostería, las características mecánicas se ven afectadas sustancialmente por el tipo de mortero ya que se obtuvo valores muy similares en los especímenes estudiados: 0.377 kg/cm² a 0.39 kg/cm². A diferencia del espécimen de ladrillo con mortero de cal, donde era de esperarse que se obtendría mayores valores de cohesión a diferencia de los especímenes hechos con mortero de barro (1.136 kg/cm² vs 0.380 kg/cm²). Confirmando que la fuerza cortante resistente provendría del tipo de mortero utilizado.
- Continuando con la afirmación anterior, si la magnitud de la carga de pre compresión utilizada en los especímenes con mortero de barro hubiera sido la misma, se hubiera obtenido un valor de fuerza cortante igual en todos los casos: adobe contemporáneo, adobe-ladrillo, adobe-piedra ya que los valores de cohesión y ángulo de fricción son similares. Con esto se puede concluir que en un escenario con solicitaciones sísmicas donde se apliquen cargas cortantes, la fuerza resistente provendría del tipo de mortero utilizado y no de la mampostería utilizada. Vale decir una vivienda hecha de adobe o ladrillo, con mortero de barro, ante un evento sísmico, resistiría lo mismo en ambos casos. Ya que en nuestros especímenes siempre se dio la falla en el mortero y nunca en la mampostería. Agregar que esta afirmación solo es válida mientras no se supere el valor máximo a la compresión en la mampostería correspondiente.
- En la norma E.080 [2], se indica los esfuerzos admisibles de diseño para el adobe tanto para la resistencia a la compresión (unidad y albañilería) y la resistencia al corte; sin embargo, no se cuenta con una resistencia al corte cuando se genera una falla por deslizamiento ya que la falla inicial se da siempre a 45° y no en el plano horizontal. Con los resultados obtenidos, se cuenta con información adicional que podría ser utilizada para analizar el comportamiento de una estructura de mampostería con mortero de barro utilizando elementos distintos en el modelo.
- Por otra parte, la fuerza cortante no es solo dependiente del tipo de mortero o especímenes a utilizar, sino también de la magnitud de la carga de pre compresión, ya que con los resultados obtenidos se genera una tendencia lineal positiva, teniendo como limite la máxima resistencia a la compresión de la mampostería.

- Con respecto a los especímenes de adobe histórico vs adobe contemporáneo, se aprecia que el adobe histórico presenta una mayor cohesión (0.45 vs 0.38 kg/cm²); sin embargo, estos especímenes al no contar con paja, fallan por compresión antes que los especímenes de adobe contemporáneo, y por ello, presentan una menor fuerza cortante máxima.
- En este trabajo se ha utilizado el mismo suelo para el mortero de todos los especímenes. Sería necesario en una siguiente fase, variar el tipo de suelo, para ver la influencia del contenido de arcilla y arenas en los valores de cohesión y ángulo de fricción.



BIBLIOGRAFÍA

- 1 D'Ayala Dina, Fonseca Ferreira Carina, Perrone Monia. *Implementation Of Retrofitting Techniques for seismic stabilization of historic earthen building using appropriate materials and local skills*. University of Bath. UK. 2011.
- 2 Miniterio de Vivienda y Construcción. Norma Técnica Peruana - E.080. 2006.
- 3 P. B. Lourenco, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal. *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi. 2006
- 4 C. Venkatramaiah, *Geotechnical Engineering*. Estados Unidos, 2006.
- 5 Drucker, D. C, Prager, W. *Solid Mechanics and plastic analysis or limit desing. Quarterly of applied Mathematics*. Estados Unidos.
- 6 The European Standard EN 1052-3:2002. *Methods Of Test For Masonry: Part 3: Determination Of Initial Shear Strength*. 2002.
- 7 Vargas Neumman Julio, Bariola Bernales Juan, Blondet Marcial. Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe. PUCP. 1984.
- 8 Vargas Neumman Julio. Construcciones de Adobe: Bases para un Código Sismo Resistente. PUCP. 1980
- 9 Miniterio de Vivienda y Construcción. Nuevas Casas Resistentes de Adobe. SENCICO, 2010.
- 10 Cardenas Lourdes. Análisis De Vulnerabilidad Estructural Del Hotel el Comercio. Tesis para optar el título de ingeniero civil. PUCP. 2008.
- 11 Ottosen Niels, Ristinmaa Matti. *The Mechanics of Constitutive Modelling*. ELSEVIER. (2005)