

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

### **Determinación de las propiedades físico-mecánicas en mampostería de ladrillo con morteros de junta**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Civil

**Autora:**

Verónica Leticia Lojano Fajardo

**Director:**

Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco

ORCID:  0000-0002-5797-1153

**Cuenca, Ecuador**

2024-09-17

## Resumen

En el contexto del desarrollo constructivo de la ciudad de Cuenca, los materiales empleados datan de varias épocas, destacando el uso de ladrillos de mampostería y morteros de pega tanto mixtos como de cemento. La evaluación de las propiedades físico-mecánicas de estos materiales se realiza mediante ensayos de laboratorio para identificar sus características y comportamiento. Este estudio se centró en el uso del cemento Portland, arena graduada y cal, conjuntamente con mampostería de ladrillo provenientes de Sinincay (Cuenca) y Susudel (Oña). Uno de los desafíos identificados en Cuenca es la falta de los modelos matemáticos desarrollados para estimar la resistencia a compresión de prismas de mampostería. El marco normativo utilizado incluyó las normas ASTM C109(2016), ASTM C1314 (2021) y la ASTM E477 (1997), que guiaron la ejecución de los ensayos. Además, para los ensayos de compresión de ladrillos y prismas de mampostería, se empleó plywood en las caras superior e inferior. Se evaluaron varios modelos matemáticos y los enfoques propuestos Hendry and Malek (1986), Bröcker (1963), Bennet et al. (1997), Dymiotis and Gutleiderer (2002), Kumavat et al. (2016), Lumantarna et al. (2014) demostraron consistencia con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, ofreciendo una base sólida para la estimación precisa de la resistencia a compresión de los prismas con los materiales y realidad de Cuenca.

*Palabras clave del autor:* cemento, cal, ladrillo panelón, prismas, compresión



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

In the context of the construction development of the city of Cuenca, the materials used date back to various periods, highlighting the use of masonry bricks and both mixed and cementitious mortars. The evaluation of the physical-mechanical properties of these materials is carried out through laboratory tests to identify their characteristics and behavior. This study focused on the use of Portland cement, graded sand and lime in conjunction with brick masonry from Sinincay (Cuenca) and Susudel (Oña). One of the challenges identified in Cuenca is the lack of mathematical models developed to estimate the compressive strength of masonry prisms. The normative framework used included ASTM C109(2016), ASTM C1314 (2021) and ASTM E477 (1997), which guided the execution of the tests. In addition, for the compression tests of bricks and masonry prisms, plywood was used on the top and bottom faces. Several mathematical models were evaluated and the approaches proposed by Hendry and Malek (1986), Bröcker (1963), Bennet et al. (1997), Dymiotis and Gutleiderer (2002), Kumavat et al. (2016), Lumantarna et al. (2014) showed consistency with the results obtained in the laboratory tests, providing a solid basis for the accurate estimation of the compressive strength of the prisms with the materials and reality of Cuenca.

*Author's Keywords:* cement, lime, panelon brick, prisms, compression



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenido

1. Introducción .....	8
1.1 Antecedentes .....	8
1.2 Problemática .....	8
1.3 Justificación .....	9
1.4 Objetivos .....	9
1.4.1 Objetivo general .....	9
1.4.2 Objetivos específicos .....	9
1.5 Alcance .....	9
2. Materiales y Metodología .....	10
2.1 Materiales .....	10
2.2 Metodología .....	10
2.2.1 Variables experimentales .....	10
2.2.2 Caracterización de los agregados .....	11
2.2.2.1 Granulometría .....	11
2.2.2.2 Densidad y absorción .....	11
2.2.3 Determinación de las dosificaciones de cada mezcla de mortero .....	13
2.2.3.1 Ensayo de consistencia .....	13
2.2.3.2 Ensayo de fluidez .....	14
2.2.4 Diseño de los especímenes de mortero .....	15
2.2.4.1 Elaboración de los especímenes de mortero .....	15
2.2.4.2 Resistencia a la compresión .....	16
2.2.5 Diseño de prismas de mampostería .....	17
2.2.5.1 Propiedades mecánicas de la mampostería de ladrillo .....	17
2.2.5.1.1 Ensayo de absorción en ladrillos .....	17
2.2.5.1.2 Resistencia a compresión de los ladrillos .....	19
2.2.5.2 Elaboración de los prismas de mampostería .....	21
2.2.5.2.1 Resistencia a la compresión de prismas .....	25
2.2.6 Fórmulas empíricas utilizadas en resistencia a compresión .....	30
3. Resultados y Discusión .....	34
4. Conclusiones y Recomendaciones .....	41
5. Referencias .....	44

## Índice de figuras

Figura 1 Granulometría del árido fino.....	11
Figura 2 Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes de ensayo. Fuente: Tomado de ASTM C109 (2016).....	15
Figura 3 Especímenes cúbicos .....	16
Figura 4 Ensayo de absorción por ebullición .....	18
Figura 5 Ensayo a compresión del ladrillo, ubicación del plywood .....	20
Figura 6 Construcción de prismas de mampostería. Fuente: Tomado de ASTM C1314 (2021).....	21
Figura 7 Lugar de medición. Fuente: Tomado de ASTM C1314 (2021) .....	22
Figura 8 Esquema del modo de falla. Fuente: Tomado de ASTM C1314 (2021).....	22
Figura 9 Construcción de los prismas .....	23
Figura 10 Configuración 4 (C4). Fuente: Tomado de Thaickavil y Thomas (2018) .....	30
Figura 11 Resistencia a la compresión de mortero mixto y mortero de cemento .....	35
Figura 12 Absorción por inmersión de 24 horas para las dos muestras de ladrillo .....	36
Figura 13 Absorción por ebullición de 24 horas para las dos muestras de ladrillo .....	36
Figura 14 Resistencia a la compresión para las dos muestras de ladrillo .....	37
Figura 15 Resistencia a compresión de los prismas de mampostería considerando ASTM C1314 y ASTM E447 .....	38
Figura 16 Resistencia a la compresión de los prismas considerando la procedencia del ladrillo y el tipo de mortero empleado .....	39
Figura 17 Análisis del comportamiento de los modelos utilizando los resultados obtenidos por el ensayo ASTM C1314 (2021).....	40
Figura 18 Histograma y distribución normal de los resultados.....	40

**Índice de tablas**

Tabla 1 Densidad y absorción de la arena.....	12
Tabla 2 Consistencia del cemento Guapán y la cal hidratada .....	13
Tabla 3 Cantidad de material utilizado y ensayo de fluidez en mortero de cemento.....	14
Tabla 4 Cantidad de material utilizado y ensayo de fluidez en mortero mixto .....	15
Tabla 5 Resistencia a la compresión, mortero de cemento.....	17
Tabla 6 Resistencia a la compresión, mortero mixto .....	17
Tabla 7 Absorción en ladrillos de Sinincay .....	19
Tabla 8 Absorción en ladrillos de Susudel.....	19
Tabla 9 Resistencia a la compresión, ladrillos de Sinincay .....	20
Tabla 10 Resistencia a la compresión, ladrillos de Susudel.....	21
Tabla 11 Factores de corrección de altura y espesor para la resistencia a la compresión del prisma de mampostería. Fuente: Tomado de ASTM 1314 (2021) .....	23
Tabla 12 Dimensiones de los prismas de mampostería para ensayo ASTM C1314.....	24
Tabla 13 Dimensiones de los prismas de mampostería para ensayo ASTM E447 .....	25
Tabla 14 Resistencia a la compresión mediante el ensayo ASTM C1314.....	26
Tabla 15 Resistencia a la compresión mediante el ensayo ASTM E447 .....	26
Tabla 16 Modos de falla producidos durante el ensayo .....	27
Tabla 17 Modelos para resistencia a compresión del prisma de mampostería .....	31
Tabla 18 Resistencia a la compresión utilizando diferentes modelos .....	32
Tabla 19 Análisis de la media y error entre los datos experimentales y los modelos numéricos.....	33

## Dedicatoria

Me llena de satisfacción dedicar este trabajo a Dios ya que sin él nada de esto sería posible y a cada uno de mis seres queridos, quienes han sido mis pilares para seguir adelante.

A mi querida madre, Martha, y a mis hermanos, Marcelo y Johanna, quienes son las personas más importantes de mi vida, mi mayor fuente de motivación y apoyo incondicional. Agradezco profundamente que siempre hayan estado a mi lado, brindándome amor y aliento para superar cada desafío y celebrar cada logro.

A mis abuelitos, quienes son la razón de sentirme tan orgullosa al alcanzar esta meta. Gracias por su amor, su incondicional confianza y la fe que siempre han puesto en mí.

A mi querido padre, Jorge, quien con su ejemplo de superación, sacrificio, amor y perseverancia me ha dado la fuerza necesaria para seguir adelante y no rendirme. Gracias a su inspirador ejemplo, he encontrado el valor necesario para superar cada obstáculo y seguir luchando. Siempre lo llevaré en mi corazón, papi este logro es para usted.

A mi familia en general, quienes han mantenido su fe en mí a lo largo de este viaje, les ofrezco mi más sincero agradecimiento por sus constantes ánimos, amor y confianza.

## Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al Ing. Daniel Mogrovejo PhD, mi tutor, por su orientación y apoyo constante a lo largo de este proyecto. Sus comentarios, sabiduría y experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis amigos más cercanos: Silvia, Alejandro, Diego, Esteban, Pedro, Karlita, Patricio, Henry, Alex y Evelyn. Su apoyo incondicional, cariño y palabras de aliento han sido invaluable a lo largo de este largo viaje. Gracias por estar siempre a mi lado, compartiendo tanto las alegrías como los desafíos. Este logro también les pertenece a ustedes.

Asimismo, deseo extender mi gratitud a todos mis amigos en general. Sus palabras de ánimo y los momentos de diversión que hemos compartido han hecho este camino mucho más llevadero y memorable. ¡Gracias de corazón a todos!

***Verónica Leticia Lojano Fajardo***

## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

El ladrillo, uno de los primeros materiales usados en la construcción, tiene sus orígenes en las antiguas civilizaciones del Medio Oriente, específicamente en los territorios actuales de Irak e Irán, hace más de dos mil quinientos años (Bianucci, 2019).

La Ciudad de Cuenca, ubicada en la provincia del Azuay, es una de las tres ciudades más grandes del Ecuador. La arquitectura de la ciudad data de varias épocas, según Achig et al. (2016) la edificación más antigua corresponde al periodo de la colonia, destacando el uso de ladrillos con mortero de cal, mármol y hierro (Espinoza & Calle, 2001).

Zamora y Chacón (1979) destacan que los griegos fueron los primeros en usar la cal grasa, seguidos por los romanos que introdujeron puzolanas para mejorar sus propiedades. Achig et al. (2016) relata que, en Cuenca, el uso histórico de la cal como mortero de pega para la mampostería ha sido significativo durante períodos específicos de su historia.

Según Gonzales, J. (2016) cuando se empezó a trabajar con ladrillos el principal aglutinante era el mortero de cal. Sin embargo, con la llegada de fábricas de cemento como Guapán y el cemento Rocafuerte en las décadas de 1960 y 1970, el uso de la cal en los morteros de pega para la mampostería fue completamente desplazado. Desde entonces, el cemento ha sido ampliamente considerado como el material más utilizado en la industria de la construcción siendo el cemento Portland el más utilizado (NTE INEN 2 518, 2010).

Con el propósito de entender el comportamiento de los materiales empleados en la construcción, se han formulado diferentes relaciones empíricas que permiten identificar la resistencia del mortero, mampostería y prismas. En una investigación realizada en diferentes literaturas, varios autores han implementado modelos que permiten predecir la resistencia a compresión de los prismas de mampostería.

### 1.2 Problemática

En el ámbito de la construcción, es fundamental comprender las propiedades y el comportamiento de los materiales para identificar sus características y mejorar la eficiencia. En Cuenca, a lo largo del tiempo, no se han desarrollado modelos matemáticos que permitan estimar de manera precisa la resistencia a la compresión de prismas de mampostería. Esta falta de herramientas genera la necesidad de realizar ensayos continuos para caracterizar

apropiadamente los materiales y diseñar estructuras que se ajusten de manera óptima a sus propiedades.

### 1.3 Justificación

Debido a la falta de modelos matemáticos en la ciudad, en esta investigación se determinará las propiedades físico-mecánicas de los morteros, ladrillos y prismas disponibles localmente. Se emplearán ecuaciones propuestas por autores como Engesser, Bröcker, Mann, Hendry and Malek, Dayaratnam, Bennet et al., Dymiotis and Gutleiderer, Kaushik et al., Gumaste et al., Christy et al., Lumantarna et al., Kumavat et al., Thaickavil y Thomas, para comparar los datos experimentales con las predicciones del modelo matemático. Este enfoque permitirá evaluar la aplicabilidad práctica de dichas ecuaciones en la ciudad.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo general

Caracterizar las propiedades físico mecánicas del mortero de pega elaborado con cemento y su comparación con el mortero mixto fabricado con cal mediante ensayos de laboratorio, obtener los resultados para cada ensayo y validar las fórmulas empíricas para resistencia a compresión de prismas utilizados en la ciudad de Cuenca.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Investigar los requisitos mínimos de los materiales a utilizar en la fabricación del mortero de pega.
2. Definir los materiales necesarios para la elaboración de morteros de cemento y mixtos.
3. Caracterizar los materiales a utilizar en la fabricación de morteros.
4. Diseñar los morteros y elaborar especímenes cúbicos y prismas.
5. Analizar a través de ensayos de laboratorio empleando las normas ASTM C109, ASTM C1314 y ASTM 447-97 los parámetros físico-mecánicos necesarios para validar las fórmulas empíricas sobre resistencia a compresión de los prismas.

### 1.5 Alcance

Esta investigación se enfoca en determinar las propiedades físico mecánicas en morteros mixtos y de cemento, además de las propiedades de la mampostería de ladrillo de Sinincay y Susudel. Además, se construirán prismas de mampostería para analizar la resistencia a compresión. Los resultados se implementarán en modelos matemáticos, analizando los datos experimentales y los datos matemáticos.

## 2. Materiales y Metodología

### 2.1 Materiales

Para la realización de los ensayos en laboratorio, se utilizó cemento hidráulico tipo Gu, que es conocido por su versatilidad, dureza y resistencia a largo plazo y cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM C1157 (2023). Con respecto a la cal se consideró la norma NTE INEN 246 (2010) donde se establecen los parámetros necesarios para la cal hidráulica hidratada para la construcción.

Para la elaboración de los morteros se utilizó arena proveniente de la compañía minera Pirincay CIA Ltda., ubicada en la Av. Luis Enrique Vázquez Km. Sn, Paute, Azuay. El agua empleada para la mezcla es agua potable proveniente de ETAPA EP. En cuanto a la mampostería, se emplearon ladrillos panelones de dos orígenes distintos, uno proveniente de una fábrica artesanal situada en el sector de Sigcho, parroquia Sinincay, Cuenca; y el otro proveniente de la fábrica FARSU, ubicada en el kilómetro 89 de la vía panamericana Cuenca-Loja.

### 2.2 Metodología

#### 2.2.1 Variables experimentales

Dentro del proyecto de investigación se quiere comparar las propiedades a compresión de los morteros de junta, utilizando mortero de cemento y mortero bastardo, con respecto al árido fino se empleó arena graduada la misma que pasa el tamiz #30 (0.6 mm) es retenida en el tamiz #100 (0.15 mm) (NTE INEN 154, 1984).

En base a la investigación realizada por Zamora y Chacón (1979) y la normativa ASTM C109 (2016), establece la dosificación de materiales para mortero bastardo y mortero de cemento portland. De la misma manera, se empleó la normativa ASTM C67 (2008) para la caracterización de los ladrillos de mampostería provenientes de Sinincay y Susudel.

Además, se utilizaron los modelos matemáticos propuestos por varios autores, como Thaickavil y Thomas (2018), incluyen en su investigación variables tales como la relación altura/espesor del prisma ( $h/t$ ), la fracción de volumen del ladrillo ( $VF_b$ ), la fracción volumétrica de la junta horizontal de mortero ( $VR_{mH}$ ), así como la resistencia del ladrillo ( $fb$ ) y la resistencia del mortero ( $fm$ ).

## 2.2.2 Caracterización de los agregados

Al caracterizar los agregados de manera adecuada asegura la calidad y el rendimiento de la mezcla. Para la elaboración del mortero de pega es necesario emplear la normativa NTE INEN 696 (2010) usada para identificar la granulometría del material y la norma NTE INEN 856(2010) para identificar las densidades y absorción del árido fino.

Para caracterizar los agregados, específicamente el árido fino, se seleccionó una muestra representativa de arena que permita la ejecución de todos los ensayos requeridos en este trabajo de investigación.

### 2.2.2.1 Granulometría

La granulometría fue realizada con una muestra de material de 500 gramos como peso inicial, el material fue previamente secado por un periodo de 24 horas.

La figura 1 indica la curva granulométrica obtenida.

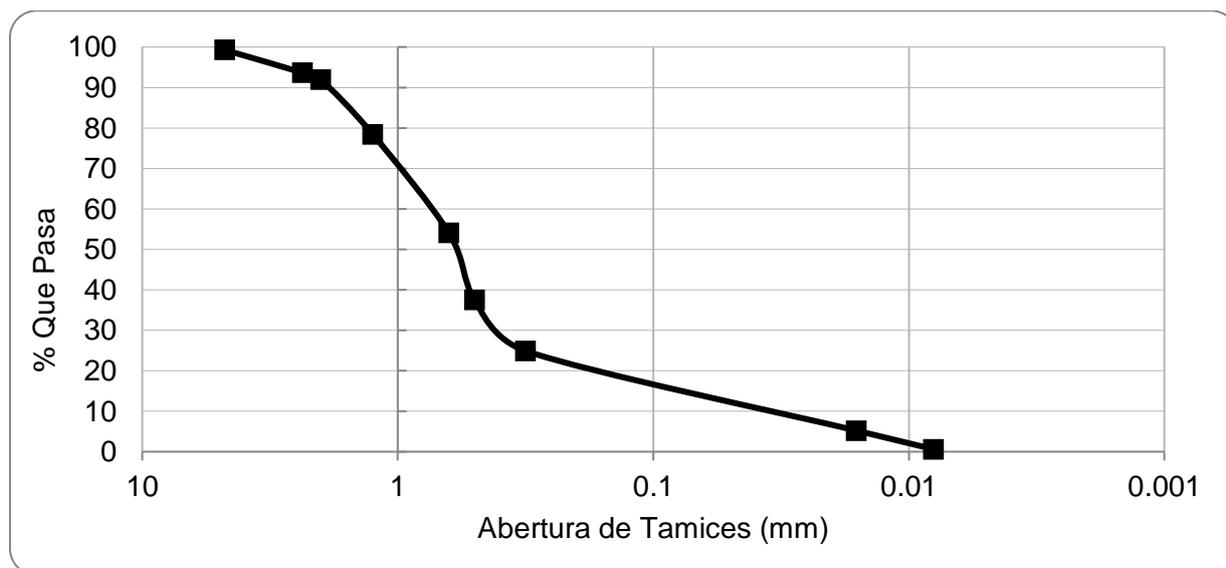


Figura 1 Granulometría del árido fino

### 2.2.2.2 Densidad y absorción

Se realizó el ensayo de densidad y absorción establecidos en la NTE INEN 856 (2010), la misma que permite determinar la densidad real, la densidad en condiciones saturadas superficialmente secas y la densidad aparente se debe utilizar la ecuación 1, ecuación 2 y ecuación 3, entendiendo que la constante 997,5 corresponde a la densidad del agua a una temperatura de 23°C, proceso explicado en la NTE INEN 856 (2010).

*Densidad real:*

$$Densidad = 997.5 * \frac{A}{B+S-C} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Donde:

- A - masa de la muestra seca (g)
- B - masa del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración (g)
- C - masa del picnómetro lleno con la muestra y agua hasta la marca de calibración (g)
- S - masa de la muestra saturada superficialmente seca (g).

*Densidad en condiciones saturadas superficialmente secas:*

$$Densidad \text{ (SSS)} = 997.5 * \frac{S}{B+S-C} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2)$$

*Densidad aparente:*

$$Densidad \text{ aparente} = 997.5 * \frac{A}{B+S-C} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3)$$

Mientras que, la absorción refleja el incremento de la masa del árido debido a la penetración de agua en los poros de las partículas durante un determinado periodo de tiempo. (ASTM C128, 2007). Esta se representa mediante la Ecuación 4.

$$Absorción = \frac{S-A}{A} \text{ (\%)} \quad (4)$$

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1 Densidad y absorción de la arena

Ensayo	Arena
Tamaño de muestra	500 g
Densidad	2301.55 kg/m <sup>3</sup>
Densidad SSS	2432.93 kg/m <sup>3</sup>
Densidad Aparente	2650.66 kg/cm <sup>3</sup>
Absorción	5.71 %

## 2.2.3 Determinación de las dosificaciones de cada mezcla de mortero

La Sociedad Americana para pruebas y materiales (ASTM) establece la dosificación necesaria en la normativa ASTM C109 (2016), la misma que debe ser de 1 - 2.75 (cemento – arena) por peso.

Mientras que, después de una revisión bibliográfica Zamora y Chacón (1979) establece las relaciones de cal y arena usadas en construcción, donde: 1-2 (cal-arena), 1-3, 1-4, 1-5 dependiendo de la calidad de la cal y el uso que se le dé. Generalmente esta mezcla se liga con cemento en las proporciones 1-8 (cemento-mezcla) para mampostería de ladrillo, 1-12 para enlucidos de paredes y el 1-15 para cimentaciones.

En el marco de esta investigación, se ha limitado a la dosificación empleada por Zamora y Chacón (1979) las cuales consisten en 1-3 (cal - arena) y de 1-8 (cemento – mezcla).

### 2.2.3.1 Ensayo de consistencia

Con base en la NTE INEN 157 (2009) se indica la cantidad de agua necesaria para la consistencia normal expresada mediante la ecuación 5.

$$C = \frac{m_a}{m_c} (\%) \tag{5}$$

Donde:

- C – consistencia normal
- ma – masa del agua en (g)
- mc – masa del cemento en (g)

Se llevó a cabo la evaluación de la consistencia en muestras de cemento y cal, y los resultados obtenidos se presentan detalladamente en la tabla 2.

Tabla 2 Consistencia del cemento Guapán y la cal hidratada

Muestra	Cantidad muestra (g)	Agua (ml)	c (%)
Cemento Guapán GU	500	150	30
Cal hidratada	500	240	48

### 2.2.3.2 Ensayo de fluidez

Para cada mezcla de mortero se realizó el ensayo de fluencia, según la ASTM C1437 (2020) se considera el promedio de las cuatro lecturas, menos el diámetro interior original de la base expresadas en la ecuación 6.

$$F = \frac{D-d}{d} * 100 (\%) \tag{6}$$

Donde:

- D - diámetro medio del mortero luego del ensayo
- d - diámetro base del molde
- F - fluencia

Al preparar la muestra de mortero según la ASTM C109 (2016), se especifica el uso de una relación de agua-cemento de 0.485 para todos los cementos portland. En la tabla 4 se detalla la cantidad de material empleado en la mezcla de mortero, al considerar 500 g de cemento y cumpliendo con lo especificado en la ASTM, se debe utilizar 242 ml de agua. Sin embargo, tras realizar el ensayo de fluidez se obtuvo un valor de 72%, el cual no satisface los criterios establecidos en la normativa. Como resultado, se ajustó la cantidad de agua mediante tanteo hasta alcanzar un volumen de 600ml que cumple con la fluidez requerida.

En lo que respecta al mortero de cal, Zamora y Chacón (1979) no define un volumen de agua específico, pero, indica que el volumen de agua debe ser tal que la mezcla pueda ser trabajable. Siguiendo este criterio se ajustó la cantidad de agua hasta que cumpla con la fluidez indicada en la ASTM C109 (2016).

Los resultados obtenidos, junto con la cantidad de materiales utilizados en cada tipo de mortero, están detallados en las tablas correspondientes (Tablas 3, 4).

Tabla 3 Cantidad de material utilizado y ensayo de fluidez en mortero de cemento

<b>Arena</b>	1375 g	
<b>Cemento</b>	500 g	
<b>Agua</b>	472 ml	
<b>Medida 1</b>	22 cm	<b>Fluidez</b> 115.68%
<b>Medida 2</b>	22.5 cm	
<b>Medida 3</b>	21.5 cm	

Tabla 4 Cantidad de material utilizado y ensayo de fluidez en mortero mixto

<b>Arena</b>	1500 g	
<b>Cal</b>	500 g	
<b>Cemento</b>	250 g	
<b>Agua</b>	600 ml	
<b>Medida 1</b>	21.9 cm	<b>Fluidez</b>
<b>Medida 2</b>	22.2 cm	115.03%
<b>Medida 3</b>	21.7 cm	

## 2.2.4 Diseño de los especímenes de mortero

### 2.2.4.1 Elaboración de los especímenes de mortero

Se realizó la preparación de cada muestra considerando el procedimiento establecido en la normativa ASTM C109 (2016), los moldes empleados están diseñados para la fabricación de especímenes cúbicos de 50 mm o (2 pulgadas), también se utilizó una mezcladora mecánica, tazón y paleta. La fluencia debe ser de  $110 \pm 5$ , al realizar 25 golpes de la mesa del ensayo de flujo. Luego se procede a compactar con el pisón en cada compartimiento cubico 32 veces, cada ronda debe ser considerada en ángulos rectos respecto a las otras y consiste en realizar ocho golpes sobre la superficie del espécimen, indicados en la figura 2. La normativa indica que los especímenes deben permanecer en los moldes por 24 horas, luego se sumergen en agua saturada de cal hasta ser ensayados.

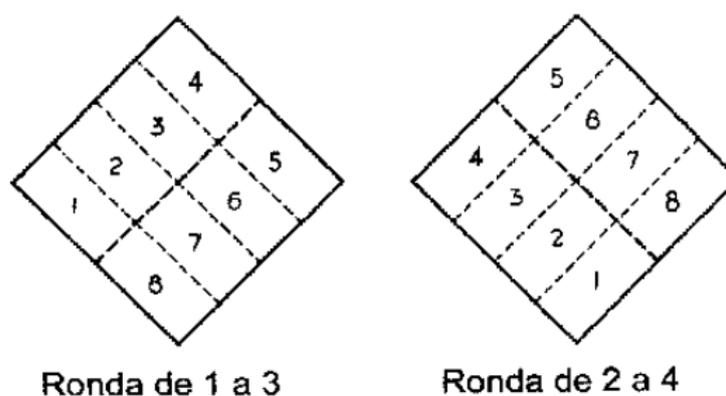


Figura 2 Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes de ensayo. Fuente: Tomado de ASTM C109 (2016)

La ASTM C109 (2016) plantea en la ecuación 7 la resistencia a compresión de los cubos de mortero.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (7)$$

Donde:

- $f_m$  – resistencia a la compresión en MPa, o lb/pulg<sup>2</sup>
- P – carga total máxima en N, (lb)
- A – área de la superficie cargada mm<sup>2</sup> (pulg<sup>2</sup>)

#### **2.2.4.2 Resistencia a la compresión**

Para llevar a cabo el ensayo de resistencia a la compresión en especímenes cúbicos de mortero, se requiere seguir el procedimiento establecido en el punto 2.2.4.1, considerando la norma ASTM C109 (2016). En la figura 3 se observan los especímenes cúbicos desmoldados después de 24 horas.



Figura 3 Especímenes cúbicos

La tabla 5 y 6 indican los valores obtenidos para resistencia a compresión de mortero de cemento y mortero mixto respectivamente.

Tabla 5 Resistencia a la compresión, mortero de cemento

Mortero	Edad (días)	Carga (Kgf)	Resistencia a la compresión (MPa)
Cemento	1	6464.85	1.38
	7	7416.72	1.95
	14	12652.00	5.06
	28	16592.47	6.64

Tabla 6 Resistencia a la compresión, mortero mixto

Mortero	Edad (días)	Carga (Kgf)	Resistencia a la compresión (MPa)
Mixto	1	719.07	0.29
	7	1110.60	0.69
	14	1242.39	0.82
	28	2711.82	1.12

### 2.2.5 Diseño de prismas de mampostería

Para la fabricación de los prismas, fue esencial caracterizar las propiedades de la mampostería de ladrillo. La normativa a considerar es la ASTM C67 (2008).

#### 2.2.5.1 Propiedades mecánicas de la mampostería de ladrillo

Se conoce que la fabricación de los ladrillos de mampostería se realiza de manera artesanal, como se mencionó en el punto 2.2.5 se ha empleado la normativa ASTM C67 (2008). Con el propósito de la investigación se han considerado los siguientes ensayos, entre ellos tenemos muestreo, número de especímenes, preparación, resistencia a la compresión, absorción.

##### 2.2.5.1.1 Ensayo de absorción en ladrillos

Para realizar este ensayo se ha considerado la normativa ASTM C67 (2008), la cual menciona que es necesario el uso de cinco piezas representativas de medio ladrillo seco, los cuales se han sumergido por un periodo de 24 horas. Para reportar la absorción de agua fría de cada espécimen se utiliza la ecuación 8.

$$\text{Absorción} = \frac{(W_s - W_d)}{W_d} * 100 \text{ (\%)} \quad (8)$$

Donde:

- Wd - peso seco del espécimen
- Ws - peso saturado del espécimen después de sumergirlo en agua fría

De la misma manera, la ASTM C67 (2008) indica el procedimiento a considerar par el ensayo de absorción por ebullición, los resultados se obtienen mediante la ecuación 9.

$$Absorción = \frac{(Wb-Wd)}{Wd} * 100 (\%) \quad (9)$$

Donde:

- Wd - peso seco del espécimen
- Wb - peso saturado del espécimen tras sumergirlo en agua hirviendo

Con respecto a la absorción por ebullición, no se dispone de un equipo que pueda acceder a una temperatura de 100 grados centígrados, en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca se dispone con un equipo de baño María que alcanzó una temperatura máxima de 89 grados centígrados, temperatura a la cual se desarrolló el ensayo. En la figura 4 se observan las muestras para la absorción en el baño María.



Figura 4 Ensayo de absorción por ebullición

Las tablas 7 y 8 muestran los resultados obtenidos para el ladrillo procedente de Sinincay y Susudel, respectivamente.

Tabla 7 Absorción en ladrillos de Sinincay

Muestra	Peso seco	Peso saturado por inmersión	Peso saturado por ebullición	Absorción por inmersión (%)	Absorción por ebullición (%)
	Wd (kg)	Ws (kg)	Wb (kg)		
1	1.74	2.14	2.12	22.65	21.44
2	1.71	2.12	2.10	24.30	23.01
3	1.75	2.09	2.07	19.42	18.61
4	1.70	2.12	2.09	24.75	23.10
5	1.75	2.09	2.07	19.86	18.26
<b>Promedio</b>	1.73	2.11	2.09	22.20	20.89

Tabla 8 Absorción en ladrillos de Susudel

Muestra	Peso seco	Peso saturado por inmersión	Peso saturado por ebullición	Absorción por inmersión (%)	Absorción por ebullición (%)
	Wd (kg)	Ws (kg)	Wb (kg)		
1	2.03	2.40	2.38	18.54	17.31
2	1.98	2.35	2.31	18.37	16.50
3	1.95	2.30	2.28	18.16	17.03
4	1.99	2.36	2.34	18.41	17.40
5	1.96	2.28	2.22	16.61	13.49
<b>Promedio</b>	1.98	2.34	2.31	18.02	16.35

#### 2.2.5.1.2 Resistencia a compresión de los ladrillos

Al igual que el ensayo anterior, la normativa ASTM C67 (2008) asigna los parámetros necesarios a considerar para el desarrollo del ensayo de compresión en mampostería de ladrillo. Para realizar este ensayo, la normativa ASTM C67 (2008) indica el uso de una capa fina de mortero en relación 1:2 en ambas caras del ladrillo con el fin de mejorar la distribución de la carga. Además, se puede utilizar placas de polímeros reforzados o materiales como el

polvo de azufre que se introducen en los poros de la superficie, siendo esta más uniforme y homogénea.

Como se ha mencionado antes, los ladrillos son fabricados de forma artesanal, por lo que sus superficies no son regulares y tienen fallas notables. Para nuestra investigación se ha adaptado un material que permita un mejor acoplamiento entre la muestra de mampostería y la placa de carga. Se uso plywood de 6 láminas o capas, ya que este es un material versátil y se puede adaptar a las caras del ladrillo. En la figura 5 se observa el proceso realizado durante el ensayo.



Figura 5 Ensayo a compresión del ladrillo, ubicación del plywood

Del mismo modo, la normativa ASTM C67 (2008) establece los parámetros a considerar para realizar el ensayo de compresión en mampostería de ladrillo. Las tablas 9 y 10 contienen un resumen de los valores obtenidos para Sinincay y Susudel respectivamente.

Tabla 9 Resistencia a la compresión, ladrillos de Sinincay

Procedencia	Sinincay	
	(N)	(MPa)
Muestra		
<b>1</b>	127095	7.55
<b>2</b>	45541	2.72
<b>3</b>	88974	5.31
<b>4</b>	124677	7.44
<b>5</b>	142050	8.41
<b>Promedio</b>	105667	6.28

Tabla 10 Resistencia a la compresión, ladrillos de Susudel

Procedencia	Susudel	
	(N)	(MPa)
Muestra		
1	145033	8.85
2	84494	5.14
3	122839	7.47
4	136512	8.20
5	103678	6.16
Promedio	118511	7.16

### 2.2.5.2 Elaboración de los prismas de mampostería

Los prismas se construyeron con respecto a las normativas establecidas como objetivos de la investigación. En la normativa ASTM C1314 (2021) se establecen los siguientes criterios, cada prisma debe ser construido en una bolsa abierta y hermética para poder encerrar y sellar el prisma terminado, en la figura 3 se observa la forma de apilado de las unidades de mampostería y se mantendrán en las bolsas herméticas hasta 48 horas antes de la prueba.

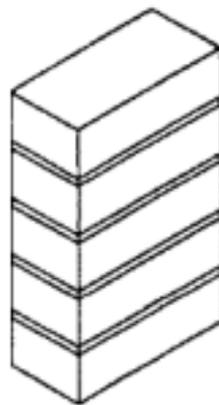


Figura 6 Construcción de prismas de mampostería. Fuente: Tomado de ASTM C1314 (2021)

Los prismas deben cumplir con la relación indicada en la ecuación 8.

$$\frac{h}{t} = 1.3 \text{ y } 5 \quad (10)$$

Donde:

- h - altura
- t - espesor

En la figura 4 se observa la forma de tomar las cuatro medidas de cada unidad de mampostería que serán promediadas. La metodología establecida indica que los prismas deben ser probados a una edad de 28 días (ASTM C1314, 2021)

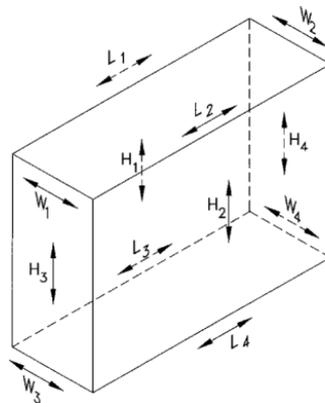


Figura 7 Lugar de medición. Fuente: Tomado de ASTM C1314 (2021)

La normativa ASTM C1314 (2021) establece los modos de falla que pueden producirse durante el ensayo (Figura 8).

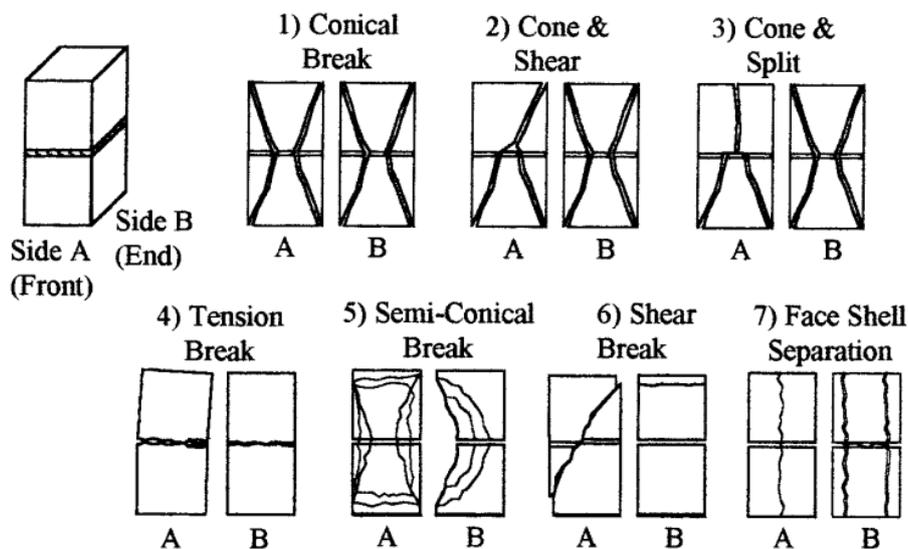


Figura 8 Esquema del modo de falla. Fuente: Tomado de ASTM C1314 (2021)

De la misma manera, presentan una tabla donde se indican los factores de relación con respecto a la dimensión de la mampostería, los mismos que están expresados en la tabla 11 (ASTM C1314, 2021).

Tabla 11 Factores de corrección de altura y espesor para la resistencia a la compresión del prisma a de mampostería. Fuente: Tomado de ASTM 1314 (2021)

hp/tp	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
Factor de corrección	0.75	0.86	1.0	1.04	1.07	1.15	1.22
<b>hp/tp – Radio de la altura del prisma vs mínima dimensión lateral del prisma</b>							

Para poder nombrar los prismas se consideraron las siguientes nomenclaturas, teniendo en cuenta que el orden será mortero - ladrillo.

- Mortero de cal - C
- Mortero de cemento – H
- Ladrillo de Sinincay – Si
- Ladrillo de Susudel – Su

En la figura 8 se observan los prismas de mampostería, mientras que en la tabla 11 se observa el promedio de las dimensiones de los prismas y la relación h/t (altura/espesor), cuyas relaciones se han analizado con la ecuación 10, y se han encontrado los factores de corrección mediante interpolación lineal, considerando los datos de la tabla 11.



Figura 9 Construcción de los prismas

Tabla 12 Dimensiones de los prismas de mampostería para ensayo ASTM C1314

Nombre	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	h/t	Factor de corrección
CaSi1	26.6	13.2	24.6	1.86	0.96
CaSi2	26.2	13.0	23.9	1.84	0.95
CaSi3	26.6	13.1	24.4	1.87	0.96
HSi1	25.9	12.7	24.3	1.91	0.98
HSi2	26.1	13.0	24.8	1.90	0.97
HSi3	26.3	13.1	23.9	1.82	0.95
HSu1	25.9	13.0	24.4	1.88	0.97
HSu2	25.9	12.9	24.5	1.89	0.97
HSu3	26.1	12.8	24.2	1.89	0.97
CaSu1	26.0	12.8	25.1	1.96	1.00
CaSu2	26.0	13.0	25.0	1.92	0.98
CaSu3	26.0	12.9	24.9	1.93	0.98

Mientras que la normativa ASTM E 447 (1997) define que las unidades de mampostería deben ser construidas y ensayadas con un mínimo de tres prismas para cada combinación de variables. Además, en la ecuación 9 se observa la relación que debe cumplir cada prisma. La junta debe tener un espesor de 10mm. El curado será por 28 días a una temperatura de  $24 \pm 8$  grados centígrados.

$$\frac{h}{t} = 2 \text{ y } 5 \quad (11)$$

Donde:

- h - altura
- t – espesor

Luego de construir los prismas y esperar el tiempo de curado indicado en la norma, se observa en la tabla 13 los promedios de las dimensiones de los prismas, además, la relación h/t (altura/espesor). Se observa que el valor de HSu2 y CaSi1 no cumplen con la relación de [2,5] establecida en la ecuación 11, esto se debe a la altura de cada ladrillo y al espesor del mortero de junta.

Tabla 13 Dimensiones de los prismas de mampostería para ensayo ASTM E447

Nombre	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	h/t
HSi1	26.2	13.0	25.3	2.0
HSi2	26.3	12.7	25.1	2.0
HSi3	26.2	12.8	24.9	2.0
HSu1	26.3	12.8	25.1	2.0
HSu2	26.3	12.9	24.9	1.9
HSu3	26.4	12.7	25.2	2.0
CaSi1	25.8	12.8	24.5	1.9
CaSi2	26.0	12.8	25.2	2.0
CaSi3	26.0	12.9	25.1	2.0
CaSu1	25.8	12.7	25.0	2.0
CaSu2	25.9	13.0	25.3	2.0
CaSu3	25.9	12.8	24.9	2.0

#### **2.2.5.2.1 Resistencia a la compresión de prismas**

De acuerdo a la normativa ASTM C1314 (2021) y la ASTM E447 (1997) se han ensayado los prismas con el fin de encontrar la resistencia a compresión. Para este ensayo se consideró el mismo principio aplicado en el punto 2.2.5.1.2, se ha utilizado plywood para permitir un mejor acople y una distribución homogénea en el prisma de mampostería.

En la tabla 14 y 15 se resumen los valores obtenidos para cada uno de los ensayos, cabe recalcar que el prisma CaSu2 no pudo ser ensayado, debido a una falla en la adhesión del mortero con el ladrillo.

Tabla 14 Resistencia a la compresión mediante el ensayo ASTM C1314

<b>Nombre</b>	<b>(N)</b>	<b>(MPa)</b>
CaSi1	74629	2.13
CaSi2	81051	2.38
CaSi3	64784	1.86
HSi1	86800	2.64
HSi2	65454	1.93
HSi3	76498	2.24
HSu1	104564	3.11
HSu2	75243	2.25
HSu3	151973	4.51
CaSu1	90708	2.70
CaSu3	100784	3.00

Tabla 15 Resistencia a la compresión mediante el ensayo ASTM E447

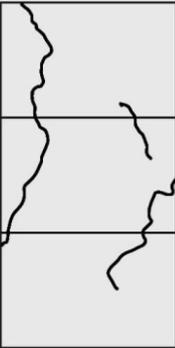
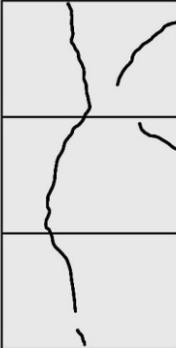
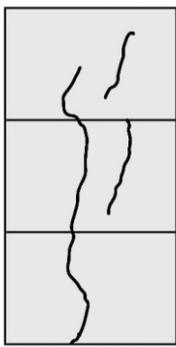
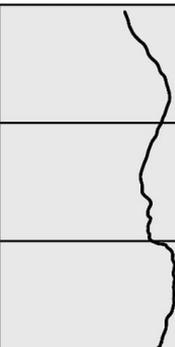
<b>Nombre</b>	<b>(N)</b>	<b>(MPa)</b>
HSi1	66478	1.95
HSi2	54004	1.60
HSi3	71487	2.11
HSu1	118523	3.49
HSu2	99450	2.93
HSu3	70457	2.05
CaSi1	68377	2.05
CaSi2	78638	2.33
CaSi3	55580	1.64
CaSu1	111296	3.34
CaSu2	108719	3.23
CaSu3	68427	2.05

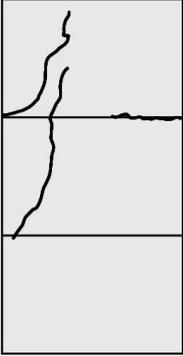
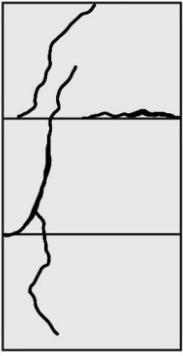
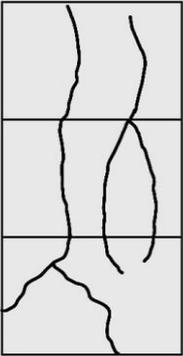
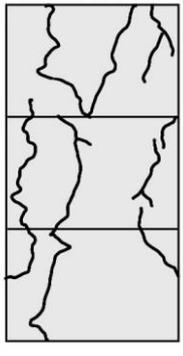
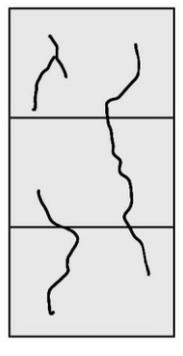
En la tabla 16 se observan los modos de falla de los prismas ocurrido durante el ensayo. Al analizar las fallas se evidencia en su mayoría fallas de cono y fractura, fallas semicónicas y roturas por corte. Estas fallas dependen directamente de la composición geométrica del prisma, ya que, debido a la forma de los ladrillos, los prismas no contienen las mismas dimensiones en cuanto a altura, para realizar el ensayo la maquina pide que se ingresen las

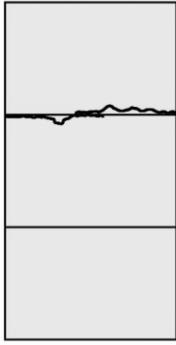
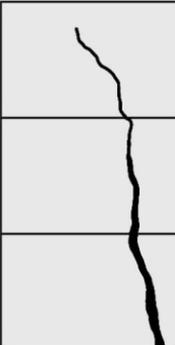
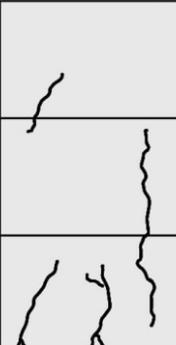
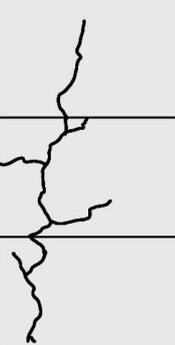
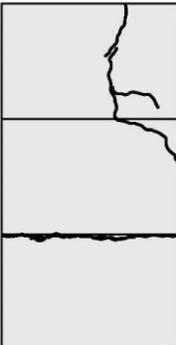
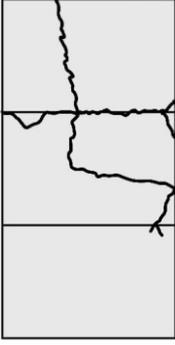
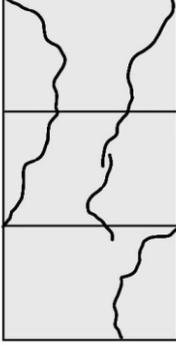
medidas del prisma, por lo que se ingresó un valor promediado que el equipo considera como uniforme. De esta manera la carga no se distribuye de forma homogénea, sino que se concentra en el punto más alto del prisma provocando fallas considerables.

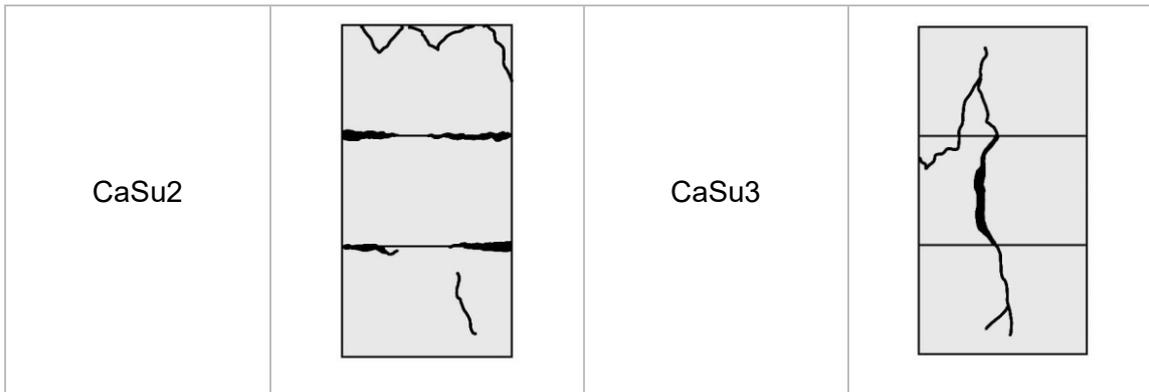
Es importante analizar correctamente la falla del prisma y el tiempo de aplicación, ya que no debe exceder los 2 minutos y se debe evitar un aplastamiento de la mampostería.

Tabla 16 Modos de falla producidos durante el ensayo

ASTM C1314	Fisuración	ASTM C1314	Fisuración
CaSi1		CaSi2	
CaSi3		HSi1	
HSi2		HSi3	

HSu1		HSu2	
HSu3		CaSu1	
CaSu2	No ensayado	CaSu3	
<b>ASTM E477</b>	<b>Fisuración</b>	<b>ASTM E477</b>	<b>Fisuración</b>
HSi1		HSi2	

HSi3		HSu1	
HSu2		HSu3	
CaSi1		CaSi2	
CaSi3		CaSu1	



**2.2.6 Fórmulas empíricas utilizadas en resistencia a compresión**

Para nuestro caso de estudio se elaboraron prismas de tres unidades de altura, con un grosor de mortero de junta que varía de 10 a 20 mm. Como plantea Thaickavil y Thomas (2018) se considera la configuración 4(C4) indicada en la figura 6.

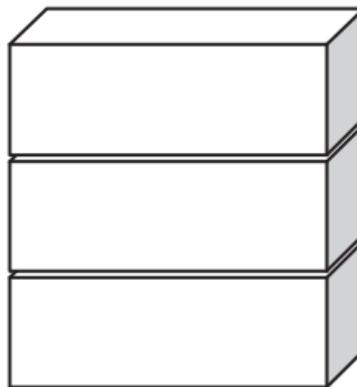


Figura 10 Configuración 4 (C4). Fuente: Tomado de Thaickavil y Thomas (2018)

Thaickavil y Thomas (2018) propone las ecuaciones 12 y 13, para calcular la fracción volumétrica del ladrillo y la fracción volumétrica de la junta horizontal de mortero, respectivamente.

$$VF_b = \frac{V_u}{V_p} \tag{12}$$

Donde VFb es la fracción volumétrica del ladrillo, Vu es el volumen de las unidades de mampostería y Vp es el volumen del prisma.

$$VR_{mH} = \frac{V_{mH}}{V_{mH} + V_{mV}} \tag{13}$$

Donde:

- VRmH – volumen total del mortero
- VmH – fracción de volumen de mortero en juntas horizontales
- VmV - fracción de volumen de mortero en juntas verticales

Luego de una amplia revisión bibliográfica se han elegido a los siguientes autores y sus modelos matemáticos, con el fin de predecir la resistencia a la compresión de la mampostería.

En la tabla x se indican los autores y las ecuaciones que emplean para su modelo matemático.

Donde:

- $f_b$  – Resistencia de la unidad de mampostería
- $f_m$  – Resistencia del mortero
- $f_p$  – Resistencia del prisma

Tabla 17 Modelos para resistencia a compresión del prisma de mampostería

Autores	Modelos
Engesser (Engesser, F., 1907)	$f_p = \frac{1}{3} f_b + \frac{2}{3} f_m$
Bröcker (Bröcker, O., 1963)	$f_p = 0.68 f_b^{1/2} f_m^{1/3}$
Mann (Mann, 1982)	$f_p = 0.83 f_b^{0.66} f_m^{0.18}$
Hendry and Malek (Hendry, AW y Malek, MH, 1986)	$f_p = 0.317 f_b^{0.531} f_m^{0.208}$
Dayaratnam (Dayaratnam, P., 1987)	$f_p = 0.275 f_b^{0.5} f_m^{0.5}$
Bennet et al. (Bennet et al., 1997)	$f_p = 0.3 f_b$
Dymiotis and Gutleiderer (Dymiotis, C. y Gutleiderer, BM, 2002)	$f_p = 0.3266 f_b * (1 - 0.0027 f_b + 0.0147 * f_m)$
Kaushik et al. (Kaushik et al., 2007)	$f_p = 0.317 f_b^{0.866} f_m^{0.134}$

Gumaste et al. (Gumaste et al., 2007)	$f_p = 0.63f_b^{0.49}f_m^{0.32}$
Christy et al. (Christy et al., 2013)	$f_p = 0.35f_b^{0.65}f_m^{0.25}$
Lumantarna et al. (Lumantarna et al., 2014)	$f_p = 0.75f_b^{0.75}f_m^{0.31}$
Kumavat et al. (Kumavat et al., 2016)	$f_p = 0.69f_b^{0.6}f_m^{0.35}$

En la tabla 18 se muestra un resumen de los valores obtenidos considerando las ecuaciones indicadas en la tabla 17.

Tabla 18 Resistencia a la compresión utilizando diferentes modelos

<b>Autores</b>	<b>(MPa)</b>
Engesser (Engesser, F., 1907)	2.84 – 6.81
Bröcker (Bröcker, O., 1963)	1.77 – 3.42
Mann (Mann, 1982)	2.85 – 4.28
Hendry and Malek (Hendry, AW y Malek, MH, 1986)	0.86 – 1.34
Dayaratnam (Dayaratnam, P., 1987)	0.73 – 1.90
Bennet et al. (Bennet et al., 1997)	1.88 – 2.15
Dymiotis and Gutleiderer (Dymiotis, C. y Gutleiderer, BM, 2002)	2.05 – 2.52
Kaushik et al. (Kaushik et al., 2007)	1.58 – 2.25
Gumaste et al. (Gumaste et al., 2007)	1.61 – 3.03
Christy et al. (Christy et al., 2013)	1.19 – 2.02
Lumantarna et al. (Lumantarna et al., 2014)	3.08 – 5.90
Kumavat et al. (Kumavat et al., 2016)	2.16 – 4.36

También, se realizará una comparación con los valores obtenidos mediante ensayos de laboratorio (ASTM C1314 y ASTM E477) y los resultados obtenidos mediante los modelos matemáticos. En la tabla 19 se realizó el análisis de la media para los parámetros indicados, también se analizó el error que existe entre  $F_{ep}$  (MPa) y  $F_{pp}$  (MPa).

Tabla 19 Análisis de la media y error entre los datos experimentales y los modelos numéricos

	Fe (MPa)	ASTM C1314		ASTM E477	
		2.35		2.63	
Autor	Fp (Mpa)	Media (Fe/Fp)	Variación (%)	Media (Fe/Fp)	Variación (%)
Engesser (Engesser, F., 1907)	4.83	0.49	105.390	0.54	83.523
Bröcker (Bröcker, O., 1963)	2.59	0.91	10.418	1.01	1.338
Mann (Mann, 1982)	3.56	0.66	51.639	0.74	35.495
Hendry and Malek (Hendry, AW y Malek, MH, 1986)	1.10	2.14	53.240	2.39	58.219
Dayaratnam (Dayaratnam, P., 1987)	1.31	1.79	44.139	2.00	50.086
Bennet et al. (Bennet et al., 1997)	2.02	1.17	14.213	1.30	23.346
Dymiotis and Gutleiderer (Dymiotis, C. y Gutleiderer, BM, 2002)	2.29	1.03	2.733	1.15	13.089
Kaushik et al. (Kaushik et al., 2007)	1.91	1.23	18.574	1.37	27.243
Gumaste et al. (Gumaste et al., 2007)	2.32	1.01	1.350	1.13	11.852
Christy et al. (Christy et al., 2013)	1.60	1.46	31.736	1.64	39.004
Lumantarna et al. (Lumantarna et al., 2014)	4.49	0.52	91.177	0.59	70.823
Kumavat et al. (Kumavat et al., 2016)	3.26	0.72	38.780	0.81	24.005

### 3. Resultados y Discusión

La caracterización de los materiales facilita la determinación del tipo de árido fino a emplear, en este caso se considera una arena gruesa. La curva granulométrica revela que aproximadamente el 50% del material está retenido entre los tamices #30 y #100, limitando así la cantidad de material a utilizar como arena graduada.

La densidad real de la arena es de  $2301.55 \text{ kg/m}^3$ , siendo el reflejo de la densidad media de las partículas sólidas en estado seco, mientras que, en condiciones saturadas superficialmente secas se tiene  $2432.93 \text{ kg/m}^3$ . Estos dos valores sirven para determinar el volumen que ocupa en la mezcla de mortero. El volumen de sólidos incluyendo el volumen de poros inaccesibles resultó de  $2650.66 \text{ kg/m}^3$ . Con respecto a la absorción se tiene un 5.71%, al realizar una revisión bibliografía no se encontró valores que sirvan de referencia para un tipo de material en específico, además, las propiedades dependen de la composición del material, su origen, tipo de arena, entre otros.

La consistencia del cemento fue de 30% considerando 500 g de muestra con 150 ml de agua, esta consistencia permite garantizar la fluidez de la mezcla y asegurar una distribución uniforme. Con respecto a la cal la consistencia fue de 48% con 500 g de muestra y 240 ml de agua, comparando los resultados obtenidos se observa que la proporción de agua necesaria para tener una pasta con consistencia adecuada es mayor en la cal, esto puede depender de varios factores como el tipo de cal, el tratamiento previo y el origen de la misma. Con respecto al cemento, este cumple con rigurosos tratamientos y controles durante la producción que permiten tener un rango de valores específicos, aunque pueden variar dependiendo de las condiciones ambientales en las que se realice el proceso de mezclado.

Con respecto a los morteros, la normativa ASTM C109 (2016) requiere que el mortero posea una fluencia de  $110 \pm 5$ , luego de realizar los respectivos ensayos se obtuvo una fluencia de 115.03% para el mortero mixto y una fluencia de 115.68% para el mortero de cemento.

La resistencia a la compresión de los morteros depende de la dosificación de materiales, el volumen de agua utilizado, el tiempo de batido, tiempo de curado, entre otros. Al observar la figura 8 se observa una clara diferencia entre la resistencia obtenida con el mortero mixto y el de cemento. El mortero mixto tiene resistencias muy bajas, siendo 1.12 MPa su resistencia a compresión a los 28 días, la normativa NTE INEN 2518 (2010) indica que el mortero tipo O es el mortero de diseño para nuestro caso de estudio, ya que considera una cantidad de cal hidratada sobre  $1 \frac{1}{4}$  a  $2 \frac{1}{2}$ , este mortero tiene una resistencia promedio mínimo a compresión a 28 días de 2.4 MPa, por lo que nuestro mortero no cumple con este requisito. Este inconveniente puede darse por varios factores, la dosificación empleada, la cantidad de arena

graduada, tiempo y modo de mezclado, pero el factor característico podría ser la cantidad de cemento utilizada disminuyendo considerablemente la resistencia y la adherencia del mortero con la mampostería de ladrillo, además que su trabajabilidad no era la adecuada, dificultando la construcción de los prismas.

Con respecto al mortero de cemento sus resistencias son más altas, según la normativa NTE INEN 2518 (2010) se recomienda un mortero tipo N para muros portantes, además, la normativa indica una resistencia promedio a la compresión a 28 días mínima de 5.2 MPa, luego del ensayo se obtuvo una resistencia de 6.64 MPa que cumple con lo especificado en la norma.

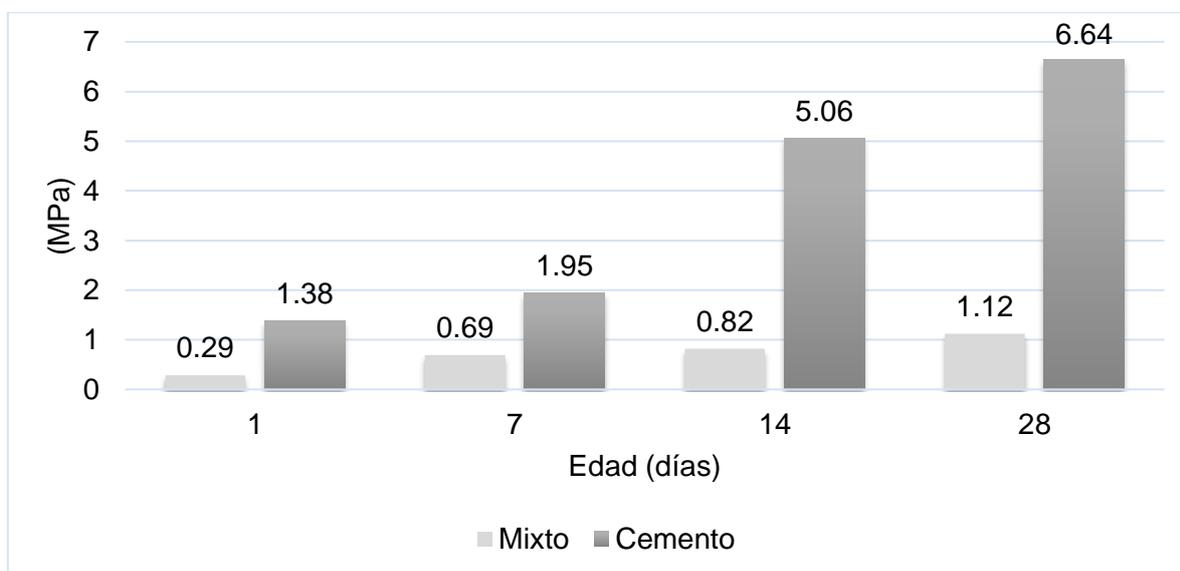


Figura 11 Resistencia a la compresión de mortero mixto y mortero de cemento

Para la mampostería de ladrillo se ha realizado el ensayo de absorción en ladrillos, en la figura 9 se observa la absorción por inmersión durante 24 horas para los dos tipos de ladrillo. El ladrillo de Sinincay fue el que mejor capacidad de absorción presentó durante el ensayo, con un promedio de 22.2%. El ladrillo de Susudel presentó una absorción de 18.02%.

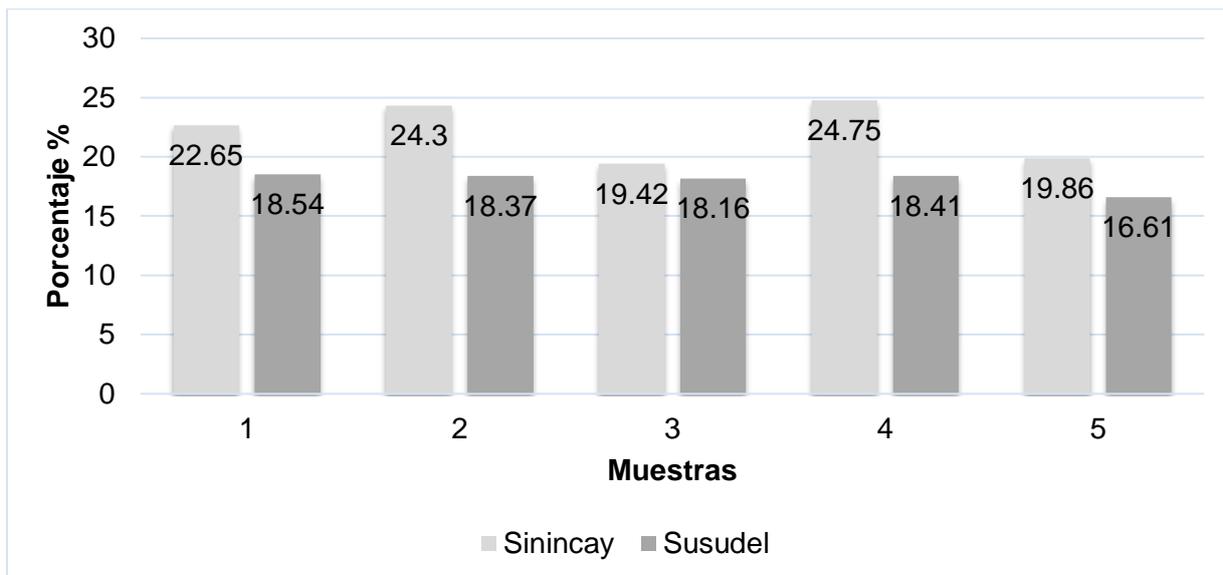


Figura 12 Absorción por inmersión de 24 horas para las dos muestras de ladrillo

En la figura 10 se evidencia los resultados obtenidos para absorción por ebullición, se observa que el comportamiento es similar al ensayo anterior, donde el ladrillo proveniente de Sinincay es el que presenta mejor absorción con un promedio de 20.89%, mientras que, el ladrillo de Susudel presenta una absorción por ebullición de 16.35%.

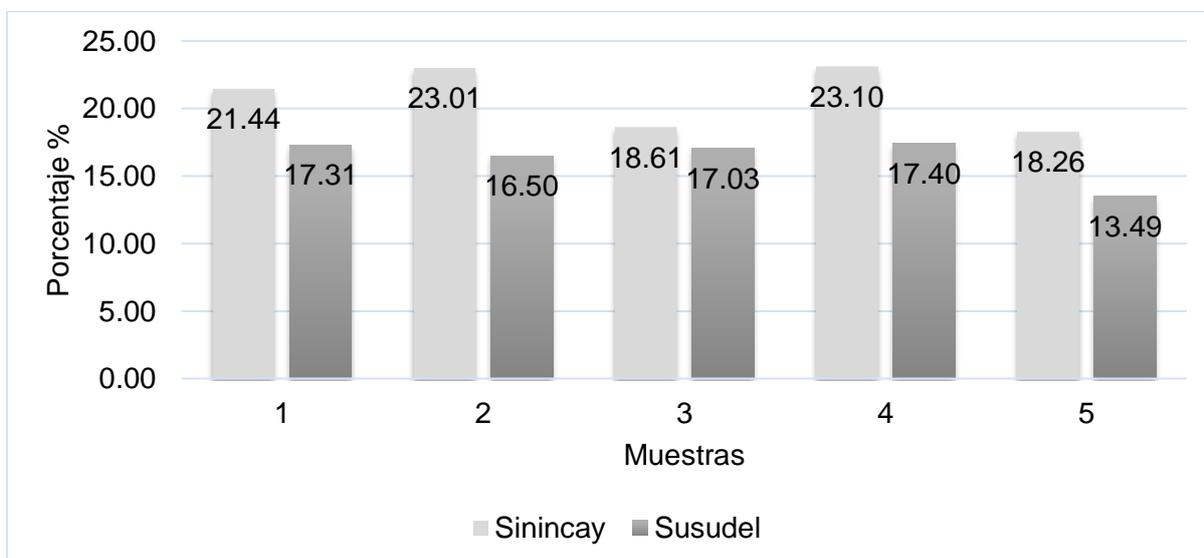


Figura 13 Absorción por ebullición de 24 horas para las dos muestras de ladrillo

Los resultados obtenidos al realizar el ensayo son presentados en la figura 11, se observa que el ladrillo de Susudel presenta mejores resistencias que el ladrillo proveniente de Sinincay obteniendo resistencias a la compresión promedio de 7.16 MPa y 6.28 MPa respectivamente. Es probable que se presente este comportamiento debido a varios factores que se presentan

durante el proceso de fabricación como el material utilizado, el tiempo y temperatura de horneado, entre otros. Estos factores no pueden ser controlados debido al tipo de fabricación.

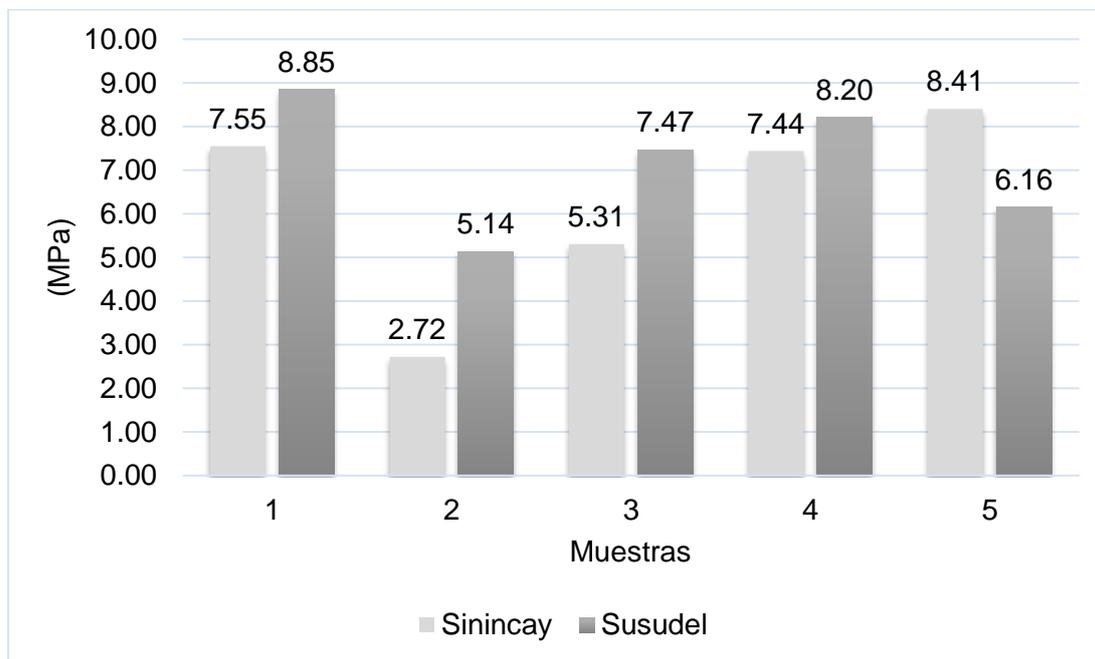


Figura 14 Resistencia a la compresión para las dos muestras de ladrillo

Para la resistencia a compresión se han encontrado los valores obtenidos en la figura 16, donde se observa los valores obtenidos a resistencia a compresión.

La resistencia a compresión conseguida por los prismas resultó inferior a la establecida en la ASTM C62 (2004) la cual indica una resistencia de 8.6MPa para resistencia mínima a compresión del área bruta para el grano NW, que es un ladrillo con poca resistencia a danos pero que es aceptable para ser usado en ambientes donde se encuentre protegido de absorción de agua y congelamiento, esto se debe a que la normativa indica que el ladrillo debe estar seco durante la construcción del prisma. Una vez aplicado el mortero, este pierde humedad al estar en contacto con el ladrillo, debido a la absorción que se genera. El mortero perdió su trabajabilidad y adhesión, dificultando el montaje.

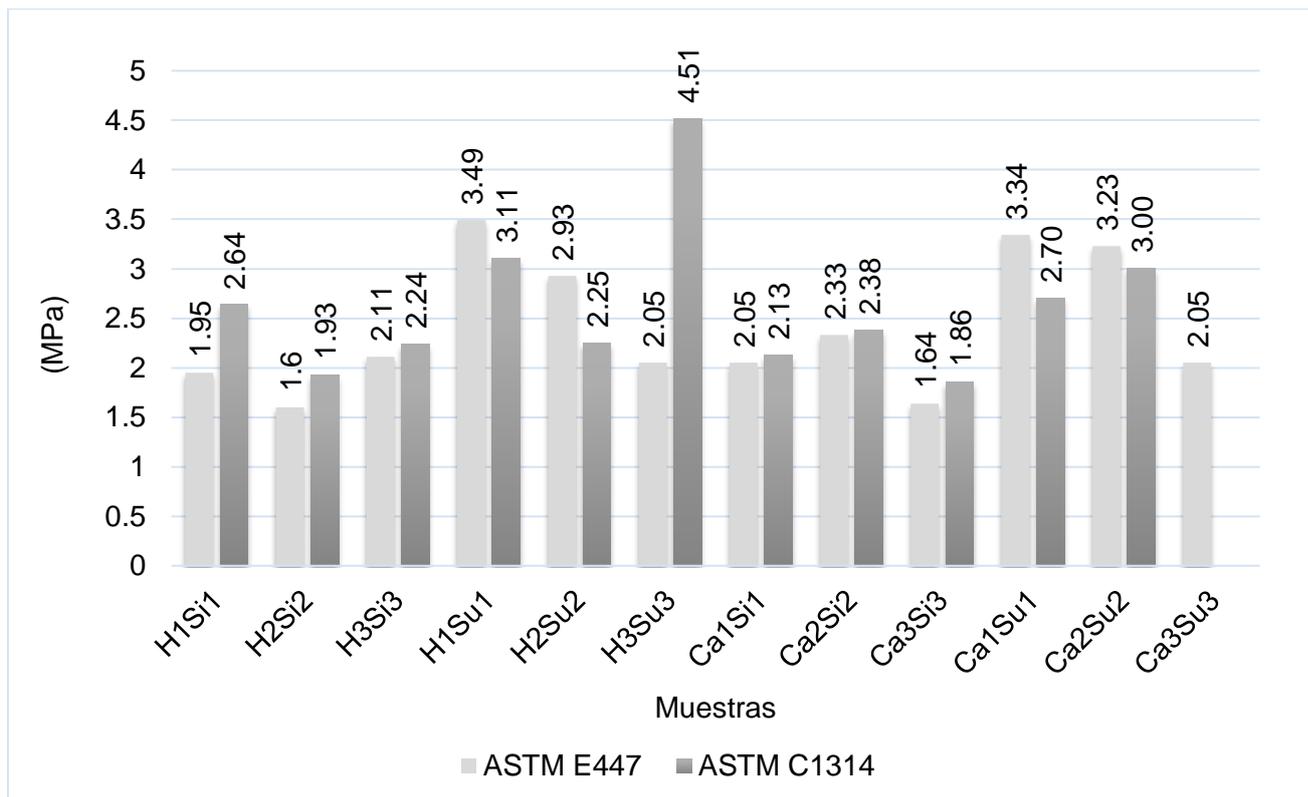


Figura 15 Resistencia a compresión de los prismas de mampostería considerando ASTM C1314 y ASTM E447

En la figura 16 se resume los promedios de la resistencia a compresión obtenidos en los ensayos de laboratorio. Las muestras HSi (ladrillo de Sinincay, mortero de cemento), HSu (ladrillo de Susudel, mortero de cemento), CaSi (ladrillo de Sinincay, mortero mixto) y CaSu (ladrillo de Susudel, mortero mixto) presentan resistencias superiores en comparación con las muestras ensayadas según la ASTM E447 (1997). Esta variación pudo darse por varios factores, uno de ellos el método de curado, además, la normativa indica que los ladrillos deben estar completamente secos, una vez aplicado el mortero, este pierde humedad al estar en contacto con el ladrillo, cambiando su trabajabilidad y adhesión, dificultando el montaje.

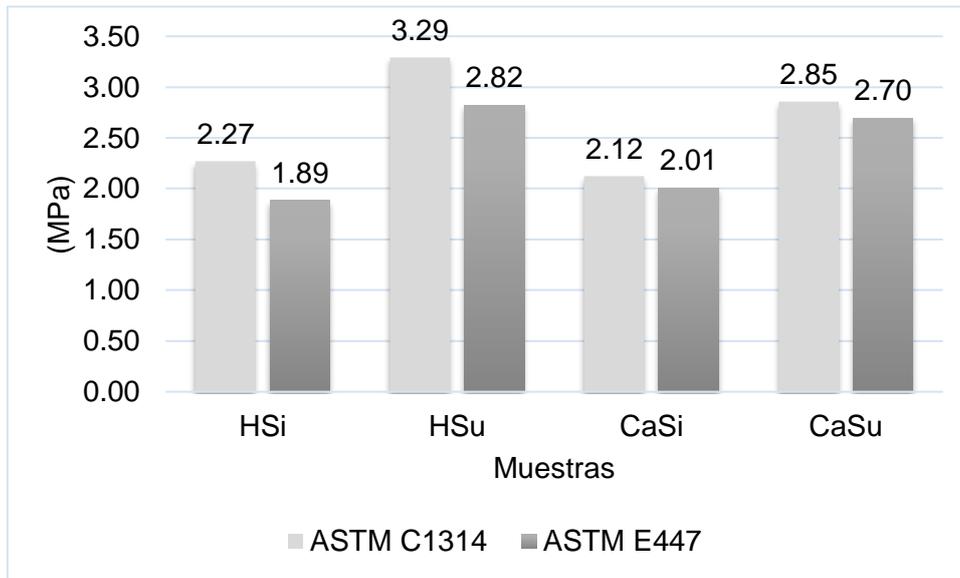


Figura 16 Resistencia a la compresión de los prismas considerando la procedencia del ladrillo y el tipo de mortero empleado

En la figura 17 se observa los valores ordenados de cada uno de los modelos matemáticos utilizados, realizando un análisis la desviación estándar es de 0.76, el valor máximo obtenido es del autor Mann (Mann,1982) mientras que el valor mínimo es del autor Gumaste. La media encontrada de todos los datos es de 1.88.

Analizando el histograma en la figura 18, se observa que la curva tiene una tendencia a forma de campana por lo que es probable que siga una distribución normal simétrica alrededor de la media. Las colas de la distribución son suaves y no tienen picos ni caídas bruscas. Los valores que se encuentran más cerca a la media son los que se encuentran entre el rango de 1.5 a 2.5

Considerando estos valores se identificó que los modelos planteados por Hendry and Malek, Bröcker (Bröcker, O.,1963), Bennet et al., Dymiotis and Gutleederer, Kumavat et al., Lumantarna et al. son los que presentaron resultados aproximados a los valores obtenidos en laboratorio, garantizando una similitud en los resultados.

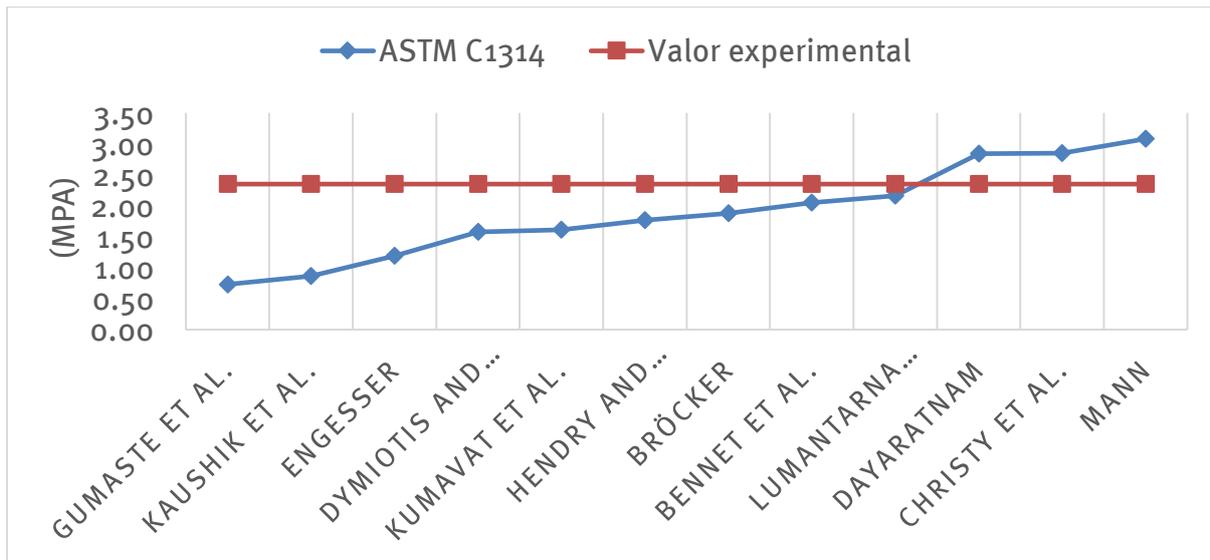


Figura 17 Análisis del comportamiento de los modelos utilizando los resultados obtenidos por el ensayo ASTM C1314 (2021)

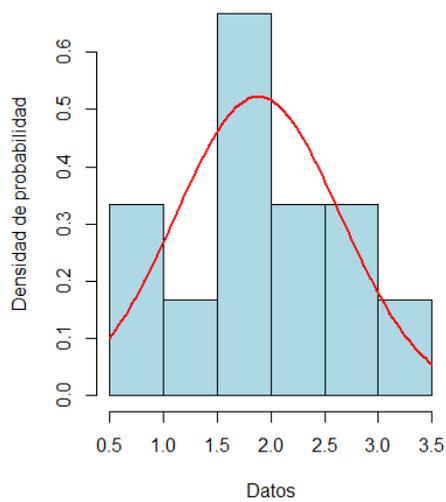


Figura 18 Histograma y distribución normal de los resultados

#### 4. Conclusiones y Recomendaciones

Se puede concluir que, los morteros de pega son mezclas flexibles, ya que la dosificación puede ajustarse según los materiales utilizados, los requisitos de resistencia y la aplicación o uso que se les dé. Los materiales necesarios para la elaboración de morteros son los áridos finos, el material cementante y el agua. Para la ejecución de este trabajo de investigación todos los ensayos fueron realizados con arena graduada, esta arena presenta mejores características en cuanto a homogeneidad y similitud. Se obtuvo una densidad real de la arena de  $2301.55 \text{ kg/m}^3$  y una absorción de 5.71%. Se debe considerar que esta condición se emplea únicamente en ensayos realizados en laboratorio, ya que, en campo al trabajar con morteros a gran escala, los áridos que se usan son seleccionados de acuerdo a la disponibilidad y sobretodo economía, tener una arena graduado implica un incremento en los costos y disminuye el rendimiento. La cal usada es cal de construcción que se encuentra en todas las ferreterías, el uso de la cal en la mezcla de mortero implica cambios en las propiedades y en la trabajabilidad.

La consistencia del cemento fue de 30% considerando 500 g de muestra con 150 ml de agua, esta consistencia permite garantizar la fluidez de la mezcla y asegurar una distribución uniforme. Con respecto a la cal la consistencia fue de 48% con 500 g de muestra y 240 ml de agua, si se compara los resultados obtenidos, la proporción de agua es mayor en la cal. Al realizar las mezclas de mortero fue necesario corregir la humedad hasta que cumplan con la fluencia indicada en la normativa, luego de realizar los respectivos ensayos se obtuvo una fluencia de 115.03% para el mortero mixto y una fluencia de 115.68% para el mortero de cemento. Al contrario, al trabajar en campo el mortero de pega debe tener una consistencia trabajable, por lo que el volumen de agua utilizado es mayor. Para diseñar los morteros de cemento y de cal, es necesario realizar un tanteo en la mezcla hasta encontrar la fluidez necesaria. Se recomienda que se cumpla con el tiempo de batido y el tiempo de ensayo y de ser necesario se realizan varios ensayos para que la humedad no se vea afectada por las condiciones ambientales y el tiempo de secado.

Con respecto al ensayo de resistencia a compresión de los especímenes cúbicos se obtuvo una resistencia de 1.12 MPa para el mortero mixto y 6.64 MPa para el mortero de cemento, comparando estos valores con la normativa NTE INEN 2518 (2010) el mortero mixto debe tener una resistencia promedio mínimo a compresión a los 28 días de 2.4 MPa, mientras que para el mortero de cemento la resistencia mínima es de 5.2 MPa. Se recomienda pruebas durante los primeros 5 días, especialmente con los morteros mixtos, dado que, al generar resistencias iniciales bajas, es crucial obtener más datos para una mejor compresión del comportamiento.

La investigación se basa principalmente en el uso de la mampostería de ladrillo, cuyas propiedades de absorción y resistencia a la compresión son críticas para establecer las pautas necesarias en el diseño de muros portantes o no portantes. El ladrillo de Sinincay fue el que presentó mejor capacidad de absorción durante el ensayo, con un promedio de 22.2%. El ladrillo de Susudel presento una absorción de 18.02%. Mientras que en los resultados para absorción por ebullición fueron de 20.89% para el ladrillo de Sinincay y 16.35% para el ladrillo proveniente de Susudel.

Al realizar el ensayo de resistencia a compresión de los ladrillos de mampostería, se observó que el ladrillo de Susudel presenta mejores resistencias que el ladrillo proveniente de Sinincay obteniendo resistencias a la compresión promedio de 7.16 MPa y 6.28 MPa respectivamente.

Dado que el proceso de fabricación de los ladrillos es artesanal, es fundamental seleccionar muestras representativas, que sean lo más homogéneas posible, evitando de esta manera muestras que presenten fracturas, que presenten un tiempo de horneado mayor al recomendado y cuyas dimensiones sean muy irregulares. Para la construcción de los prismas se recomienda mojar previamente las caras de los ladrillos, para evitar la pérdida de humedad del mortero, mantener la trabajabilidad y evitar la reducción de la adhesión, es importante que el armado sea rápido y lo más nivelado posible. Para la colocación del mortero se usó un calibrador para la que la altura del mortero no supere los 2 cm indicados en la norma. Para ensayar la resistencia a compresión de los ladrillos y los prismas se ocupó plywood en las caras superior e inferior de cada muestra, este material permitió que la carga se distribuya de una manera constante en toda la cara, evitando fallos por irregularidades en las caras superiores e inferiores.

La resistencia a compresión de los prismas resultó inferior a la establecida en la ASTM C62 (2004) la cual indica una resistencia de 8.6MPa para resistencia mínima a compresión del área bruta para el grano NW.

Se obtuvo la resistencia a compresión de los prismas mediante la ASTM C1314(2021) cuyos prismas presentaron resistencias superiores en comparación con los de la ASTM E447 (1997). Al analizar estos resultados se concluye que esta variación pudo darse por varios factores, uno de ellos el método de curado y la exposición a cambios en las condiciones medio ambientales.

Los modos de falla obtenidos en su mayoría fueron por rotura, corte y rotura cónica, el tiempo de ensayo no debe ser menor a un minuto ni mayor a dos minutos, se recomienda realizar

ensayos previos para identificar la velocidad adecuada del ensayo. En este caso la velocidad optima fue de 6 mm/min.

Finalmente, tras analizar diversos modelos matemáticos, se concluye que los enfoques propuestos por Hendry and Malek, Bröcker (Bröcker, O.,1963), Bennet et al., Dymiotis and Gutleiderer, Kumavat et al., Lumantarna et al. mostraron resultados consistentes con los obtenidos en pruebas de laboratorio. Esta consistencia asegura la aplicabilidad de estos modelos en la estimación de resistencias a compresión utilizando materiales locales. Además, estas similitudes permiten realizar un ajuste a los modelos para desarrollar correlaciones que minimicen los errores y proporcionen un modelo matemático preciso para la ciudad.

## 6. Referencias

Achig, M. C., Paredes, M. C., Barsallo, M. G., Achig, M. C., Paredes, M. C., & Barsallo, M. G. (2016). *Estudio y propuestas de color para la arquitectura del Centro Histórico de Cuenca - Ecuador*. Estoa. Revista de La Facultad de Arquitectura y Urbanismo de La Universidad de Cuenca, 5(8), 106–124. <https://doi.org/10.18537/EST.V005.N008.08>

ASTM C109 Standard Test Method for Compressize Strength of Hydraulic Cement Mortar, (1993) Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1916 Race Steet, Philadelphia, PA 19103.

ASTM C1157. (2023). Standard Performance Specification for Hydraulic Cement1.

ASTM C1314. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms1.

ASTM C1437. (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar1.

ASTM C62. (2004). Standard Specication for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale).

ASTM C67. (2008). Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.

ASTM, E. 447-97 (2017) Test Methods for Compressive Strength of Laboratory Constructed Masonry Prisms. American Society for Testing and Materials Pennsylvania, USA.

Bennett, RM, Boyd, KA y Flanagan, RD (1997). *Propiedades compresivas de prismas estructurales de tejas de arcilla*. Revista de ingeniería estructural, 123 (7), 920-926.

Bianucci, M. (2009). *El ladrillo—Orígenes y desarrollo*. FAU-UNNE. Obtenido de <https://arquitectologicofau.files.wordpress.com/2012/02/el-ladrillo-2009.pdf>.

Bröcker, O. (1963). *Die auswertung von tragfähigkeitsversuchen an gemauerten wänden*. Betonstein-Zeitung, 10, 19-21.

Dayaratnam, P. (1987). *Brick and reinforced brick structures*. South Asia Books.

Dymiotis, C. y Gutleederer, BM (2002). *Teniendo en cuenta incertidumbres en el modelado de la resistencia a la compresión de la mampostería*. Materiales de construcción y edificación, 16 (8), 443-452.

Engesser (Engesser, F., 1907), F. (1907). *Über weitgespannte wölbrücken*. Zeitschrift für Architekturs und Ingenieurwesen, 53, 403-440.

Espinoza, P. & Calle, I. "*Presencia de la Arquitectura Neoclásica Francesa en Cuenca: Una Huella Indeleble (1860-1940)*". Cuenca: Universidad de Cuenca, 2001.

Freeda Christy, C., Tensing, D. y Mercy Shanthi, R. (2013). *Estudio experimental sobre la resistencia a la compresión axial y el módulo de elasticidad de mamposterías de ladrillos de arcilla y cenizas volantes*. Revista de Ingeniería Civil y Tecnología de la Construcción, 4 (4), 134-141.

Gonzales, J. (2016), *Estudio del mortero de pega usado en el Cantón Cuenca*. Propuesta de mejora, utilizando adiciones de cal. Universidad de Cuenca. 111.

Gumaste, KS, Nanjunda Rao, KS, Venkatarama Reddy, BV y Jagadish, KS (2007). *Resistencia y elasticidad de prismas y carteras de mampostería de ladrillo bajo compresión*. Materiales y estructuras , 40 , 241-253.

Hendry, AW y Malek, MH (1986). *Resistencia a la compresión característica de las paredes de ladrillo a partir de los resultados de las pruebas recopiladas*. INT. DE ALBAÑILERÍA. Albañilería Int. , (7), 15.

Kaushik, HB, Rai, DC y Jain, SK (2007). *Características tensión-deformación de mampostería de ladrillos de arcilla bajo compresión uniaxial*. Revista de materiales en Ingeniería Civil, 19 (9), 728-739.13

Kumavat, (2016). *Una investigación experimental de las propiedades mecánicas en mampostería de ladrillos de arcilla mediante el reemplazo parcial de agregado fino con desechos de ladrillos de arcilla*. Revista de la Institución de Ingenieros (India): Serie A, 97 , 199-204.

Lumantarna, R., Biggs, DT e Ingham, JM (2014). *Resistencia a la compresión uniaxial y rigidez de prismas de mampostería extraídos en campo y contruidos en laboratorio*. Revista de Materiales en Ingeniería Civil, 26 (4), 567-575.

Mann, W. (mayo de 1982). *Evaluación estadística de ensayos en mampostería por funciones potenciales*. Sexto Congreso Internacional de Albañilería.

NTE INEN 154: *Materiales de construcción – Cemento – Requisitos*. (1984). Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

NTE INEN 2 518. 2010. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. QUITO-ECUADOR: INEN, 2010.

NTE INEN 246. (2010). *Cemento Portland - Especificaciones*. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

NTE INEN 2518. (2010). *Bloques de concreto para mampostería - Especificaciones*. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

NTE INEN 696. (2010). *Arena para construcción - Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

NTE INEN 856. (2010). *Cal hidratada para construcción - Especificaciones*. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

Salamanca Correa, R., (2001). *La tecnología de los morteros*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, (11), 41-48.

Thaickavil, N. N., & Thomas, J. (2018). *Behaviour and strength assessment of masonry prisms*. Case Studies in Construction Materials, 8 (October 2017), 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.12.007>

Zamora S., E., & Chacón J., H. (1979). *Cal: estudio de mejoramiento y nuevos sistemas de uso en la construcción* (Bachelor's thesis). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/6247>