

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**UNIDAD DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“MODELO CONSTITUTIVO DE DAÑO PLÁSTICO PARA
DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO EN COMPRESIÓN DE LA
ALBAÑILERÍA CON LADRILLO ARTESANAL NO CONFINADA”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

Ing. LUIS MARTIN LAVADO DURAND

ASESOR:

Dr. CARLOS ALBERTO ZAVALA TOLEDO

LIMA, PERÚ

2024

**“MODELO CONSTITUTIVO DE DAÑO PLÁSTICO PARA
DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO EN COMPRESIÓN DE LA
ALBAÑILERÍA CON LADRILLO ARTESANAL NO CONFINADA”**

Ing. LUIS MARTIN LAVADO DURAND

Presentado a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en
cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

2024

Autor : Ing. Luis Martin Lavado Durand

**Recomendado : Dr. Carlos Alberto Zavala Toledo
Asesor de la Tesis**

**Aceptado por : Dra. Heddy Marcela Jimenez Yabar
Directora (e) de la Unidad de Posgrado**

@ 2024; Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados ó el autor autoriza a la UNI-FIC a reproducir la tesis en su totalidad o en partes.



DEDICATORIA

A mis padres



AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi mas profundo reconocimiento a mi profesor y asesor Dr. Carlos Alberto Zavala Toledo, por todos sus consejos y apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco a mis amigos del Laboratorio de Estructuras del CISMID, quienes apoyaron en la parte experimental.



ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
LISTA DE TABLAS.....	VII
LISTA DE GRÁFICAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I : FUNDAMENTO TEÓRICO	3
1.1. ANÁLISIS EXPERIMENTAL	3
1.2. MODELO CONSTITUTIVO.....	3
CAPÍTULO II : PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	9
2.1. ACERCA DE LA MUESTRA ESTUDIADA.....	12
2.2. ENSAYO EN UNIDADES	14
2.2.1. Propiedades físicas de las unidades	14
2.2.2. Propiedades Mecánicas de las Unidades.....	16
2.3. ENSAYOS EN MORTEROS.....	22
2.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE PRISMAS	24
2.5. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL.....	27
2.6. ENSAYO DE CORTE EN LA UNIÓN LADRILLO MORTERO.....	30



CAPITULO III: MODELO CONSTITUTIVO DE LA ALBAÑILERIA NO CONFINADA	35
3.1. MODELO DE DAÑO PLÁSTICO.....	35
3.2. PARÁMETROS PARA EL MODELO CONSTITUTIVO.....	36
3.2.1. Parámetros para el modelo constitutivo del ladrillo tipo ART1.....	36
3.2.2. Parámetros para el modelo constitutivo del ladrillo tipo ART3.....	41
3.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA	45
3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
3.4.1. Análisis de resultados ladrillo ART1	47
3.4.2. Análisis de resultados ladrillo ART3	50
CONCLUSIONES.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXOS.....	57
ANEXO 1. ENSAYOS DE LAS UNIDADES.....	58
ANEXO 2. ENSAYOS DE MORTEROS.....	59
ANEXO 3. ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL	60
ANEXO 4. ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAGONAL	61
ANEXO 5. ENSAYOS DE CORTE EN LA UNIÓN MORTERO LADRILLO	62



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Uso de la albañilería en Lima	13
Tabla 2 Identificación de las unidades según su procedencia	13
Tabla 3. Medidas promedio de ladrillos	14
Tabla 4. Propiedades físicas de unidades	15
Tabla 5. Resultados de ensayos de compresión en unidades.....	16
Tabla 6. Resultados de ensayo de flexión en las unidades	19
Tabla 7. Propiedades de la arena	23
Tabla 8. Resultados de ensayos de compresión de morteros	24
Tabla 9. Resumen de ensayos de compresión axial en prismas.....	27
Tabla 10. Resumen de ensayos de tracción diagonal.....	29
Tabla 11. Resumen de ensayos de propiedades mecánicas.....	29
Tabla 12. Niveles de confinamiento	32
Tabla 13. Resultados de ensayos de corte directo	34
Tabla 14. Esfuerzo deformación inelástica en compresión, ladrillo tipo ART1	38
Tabla 15. Curva de daño en compresión para ladrillo tipo ART1	39
Tabla 16. Esfuerzo deformación inelástica en compresión, ladrillo tipo ART3.....	42
Tabla 17. Curva de daño en compresión para ladrillo tipo ART3	43
Tabla 18. Resultados de ensayo de compresión axial en prismas (ART1)	49
Tabla 19. Resultados del análisis numérico de prismas con ladrillos ART1.....	50
Tabla 20. Resultados de ensayo de compresión axial en prismas (ART3)	52
Tabla 21. Resultados del análisis numérico de prismas con ladrillos ART3.....	53



LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Respuesta del concreto a carga axial.....	5
Gráfica 2. Modelo de daño plástico.....	7
Gráfica 3. Modelo de Kent DC, & Park R.....	8
Gráfica 4. Curva esfuerzo deformación de ladrillo tipo ART1	17
Gráfica 5. Curva esfuerzo deformación de ladrillo tipo ART3	17
Gráfica 6. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART1-M01.....	20
Gráfica 7. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART1-M03.....	20
Gráfica 8. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART3-M02.....	21
Gráfica 9. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART3-M03.....	21
Gráfica 10. Curva granulométrica de la arena.....	22
Gráfica 11. Curvas esfuerzo deformación de morteros.....	24
Gráfica 12. Correlación entre el módulo de elasticidad y esfuerzo de compresión axial. .	26
Gráfica 13. Correlación entre esfuerzo cortante y esfuerzo de confinamiento.....	34
Gráfica 14. Curva esfuerzo deformación en compresión ladrillo tipo ART1	37
Gráfica 15. Curva de daño en compresión para ladrillo tipo ART1	37
Gráfica 16. Curva esfuerzo deformación en tracción para ladrillo tipo ART1	40
Gráfica 17. Curva de daño en tracción para ladrillo tipo ART1	40
Gráfica 18. Curva esfuerzo deformación en compresión ladrillo tipo ART3	41
Gráfica 19. Curva parámetro de daño-Deformación inelástica	43
Gráfica 20. Curva esfuerzo deformación en tracción ladrillo tipo ART3	44
Gráfica 21. Curva de daño en tracción ladrillo tipo ART3	44
Gráfica 22. Curvas esfuerzo deformación: Resultados numérico y experimental (ART1)	48
Gráfica 23. Curvas esfuerzo deformación: Resultados numérico y experimental (ART3)	51



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de modelamiento de la albañilería no confinada.....	4
Figura 2. Diagrama de actividades de ensayos de unidades de albañilería.....	9
Figura 3. Diagrama de actividades de ensayos de mortero.....	10
Figura 4. Diagrama de actividades de ensayos de compresión axial en prismas.....	10
Figura 5. Diagrama de actividades de ensayos de corte directo.....	11
Figura 6. Diagrama de actividades de ensayos tracción diagonal.....	11
Figura 7. Viviendas de albañilería en Lima.....	12
Figura 8. Ubicación de puntos de producción de unidades artesanales.....	13
Figura 9. Unidades artesanales usadas.....	14
Figura 10. Ensayos de propiedades físicas de las unidades.....	15
Figura 11. Ensayo de compresión de unidades.....	16
Figura 12. Unidades para ensayo de flexión.....	18
Figura 13. Esquema del ensayo de flexión.....	18
Figura 14. Fisura en ladrillo.....	19
Figura 15. Ensayo de resistencia a la compresión en cubos de mortero.....	23
Figura 16. Equipo de ensayo.....	25
Figura 17. Tipos de fallas en prismas.....	26
Figura 18. Ensayo de tracción diagonal.....	28
Figura 19. Fallas en muretes.....	28
Figura 20. Modelo de espécimen a ensayar en corte directo.....	30
Figura 21. Preparación de especímenes.....	32
Figura 22. Ensayo de corte directo.....	33
Figura 23. Variación de la rigidez.....	36
Figura 24. Geometría del Ladrillo.....	45
Figura 25. Introduciendo las propiedades del material en el programa.....	45
Figura 26. Ingreso de las propiedades del contacto en el programa.....	46
Figura 27. Modelado del prisma y de la interface.....	46
Figura 28. Elemento C3D8R usado para el modelamiento numérico.....	47
Figura 29. Edición de las condiciones de borde y carga.....	47
Figura 30. Resultados del prisma ART 1.....	48
Figura 31. Resultados del prisma ART 3.....	51



RESUMEN

Actualmente la albañilería se utiliza en muchas partes del mundo como material estructural para edificaciones de viviendas. Es un material de bajo costo, tiene buenas propiedades de aislamiento acústico y térmico, de fácil disponibilidad, y es fácil obtener mano de obra en cada lugar. En cuanto a nuestro país, de acuerdo a la experiencia de inspección, evaluación y análisis de edificaciones existentes en la ciudad de Lima realizadas por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) se ha visto que la albañilería es el material más usado en edificaciones de viviendas y una de las tipologías es la edificación de albañilería de ladrillo artesanal.

En la presente investigación se estudia el comportamiento de la albañilería no confinada que se elabora con ladrillo artesanal. Hacer modelos matemáticos de estructuras con muros de albañilería requiere de las propiedades del material y relaciones constitutivas de la albañilería y los elementos que lo conforman, es decir, ladrillos y mortero. Se presenta inicialmente ensayos de laboratorio realizados para determinar las propiedades mecánicas de la albañilería no confinada elaboradas con ladrillo artesanal y de sus componentes: ladrillo y mortero. También se realizaron ensayos para determinar el comportamiento de la unión mortero ladrillo mediante el criterio de falla de Mohr Coulomb.

Luego, para caracterizar el material se ha utilizado el modelo constitutivo de daño plástico del concreto, el cual es usado para predecir el comportamiento de materiales frágiles. Se ha realizado el análisis numérico utilizando el programa Abaqus.



ABSTRACT

Masonry is currently used in many parts of the world as a structural material for dwellings. It is a low-cost material, it has good acoustic and thermal insulation properties, and it is easy to obtain manpower in each place. As for our country, according to the experience of inspection, evaluation and analysis of existing buildings in the city of Lima carried out by the Japan Peru Center for Research Earthquake and Disaster Mitigation (CISMID) it has been seen that masonry is the most used material in houses buildings and one of the typologies is the handmade brick masonry building.

In the present research, the behavior of unconfined masonry that is made with handmade brick is analysed. Making mathematical models of structures with masonry walls requires the mechanical properties of the material and constitutive relationships of the masonry and all of its elements, bricks and mortar. Initially, laboratory tests are presented to determine the mechanical properties of unconfined masonry made with handmade brick and its components: brick and mortar. Tests were also carried out to determine the behavior of the mortar-brick joint using the Mohr Coulomb failure criterion.

Then, to characterize the material, the constitutive model of plastic damage of concrete has been used, which is used to predict the behavior of brittle materials. Numerical analysis has been performed using the Abaqus program.



INTRODUCCIÓN

Los ladrillos han sido utilizados como elemento para la construcción desde hace unos 11.000 años. Los primeros en utilizarlos fueron los agricultores del neolítico pre cerámico del Levante hacia 9500 a. c quienes construían viviendas con planta circular semiexcavadas en el suelo con zócalos de piedra y muros hechos de adobe.

En la ciudad de Lima se encuentran sitios arqueológicos hechos de adobe entre ellos la Huaca Huallamarca que fue probablemente un santuario o templo religioso propio de la tradición cultural Pinazo (años 100 a.C. a 200 d.C.) y la Huaca Pucllana perteneciente a la cultura Lima, del periodo de los desarrollos regionales (200 - 700 d.C.).

Actualmente las edificaciones de albañilería se utilizan en muchas partes del mundo. Es un material de bajo costo, tiene buenas propiedades de aislamiento acústico y térmico, de fácil disponibilidad, y es fácil obtener mano de obra en cada lugar.

Según Estudios de Microzonificación Geotécnica Sísmica y Evaluación del Riesgo realizadas por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) en los distritos de Lima, se ha visto que la albañilería es el material más usado en edificaciones de viviendas y una de las tipologías es la edificación de albañilería de ladrillo artesanal.

Hacer modelos matemáticos de estructuras con muros de albañilería requiere de las propiedades del material y relaciones constitutivas de la albañilería y los elementos que lo conforman, es decir, ladrillos y mortero.

En el Perú se han venido desarrollando estudios para determinar las características de la albañilería en universidades y centros de investigación, como el Laboratorio de Estructuras del CISMID desde el año 1988 se han realizado ensayos a escala natural y ensayos en especímenes de albañilería. (T. Izquierdo,1989), (Lavado L., 2014), (Lavado L., 2019),



(Base de Datos del Laboratorio de Estructuras, SATREPS Project JICA – Gobierno Del Perú, PPR-068).

En la Universidad de Drexel Filadelfia USA, Mohammad Bolhassani en su investigación “Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages” (2015) utiliza el modelo constitutivo de daño plástico del concreto (CDP) para simular la respuesta no lineal de las unidades de albañilería y mortero, basado en los estudios de Lublinier (1988), dado que al igual que el concreto son materiales frágiles.

Santos (2017) El modelo de daño plástico del concreto en una adaptación del modelo de Drucker-Prager y ha sido desarrollado para predecir el comportamiento de materiales, y adaptado a materiales cuasi-frágiles como rocas y morteros bajo condiciones de carga cíclica. Las grietas en tensión o aplastamiento en compresión son los principales modos de falla de este modelo.

Se realizaron ensayos de laboratorio de unidades de arcilla y de prismas. Las unidades utilizadas son de fabricación artesanal, las cuales son usadas en edificaciones de vivienda en la ciudad de Lima. Asimismo, se realizó el análisis numérico utilizando el modelo de daño plástico del concreto para verificar si este modelo puede predecir el comportamiento de este material.

CAPÍTULO I : FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

La albañilería es un material heterogéneo cuyos componentes son las unidades y el mortero. Las unidades son los ladrillos, adobes, piedras irregulares y otros. El mortero puede ser arcilla, mortero a base de cal/cemento u otros. El modelado preciso requiere una descripción experimental exhaustiva del material compuesto, de cada uno de sus componentes ladrillo, mortero, propiedades de la interface ladrillo mortero.

Como parte del Proyecto Fortalecimiento de Tecnologías para Terremoto y Tsunamis – SATREPS, que fue desarrollado por la UNI con la cooperación técnica del Gobierno del Japón desarrolladas durante el año 2013, se llevaron a cabo estudios experimentales para caracterizar la albañilería de ladrillo artesanal utilizada en la ciudad de Lima en edificaciones de viviendas.

1.2. MODELO CONSTITUTIVO

Según Lourenço (1996), las propiedades de la albañilería no son las mismas en todas las direcciones debido a que la unión mortero ladrillo actúa como un plano frágil. Usualmente, la representación numérica de este material puede enfocarse de dos maneras, mediante el micro modelado de cada uno de sus componentes mortero y ladrillo o como un macro modelo tomándose la albañilería como un compuesto.

(Figura 1). Dependiendo del análisis que se decida hacer se puede adoptar alguna de las siguientes posibilidades:

- Micro modelado donde las unidades, el mortero, así como las uniones son representadas por elementos continuos mientras que la interface mortero ladrillo que es representada por elementos discontinuos.
- Micro modelo simplificado donde las unidades expandidas se representan mediante elementos continuos mientras que el comportamiento de las juntas de mortero y la interface mortero ladrillo son unidos en elementos discontinuos.
- Macromodelado: las unidades, el mortero y la interfaz unidad-mortero se unen como un solo material.

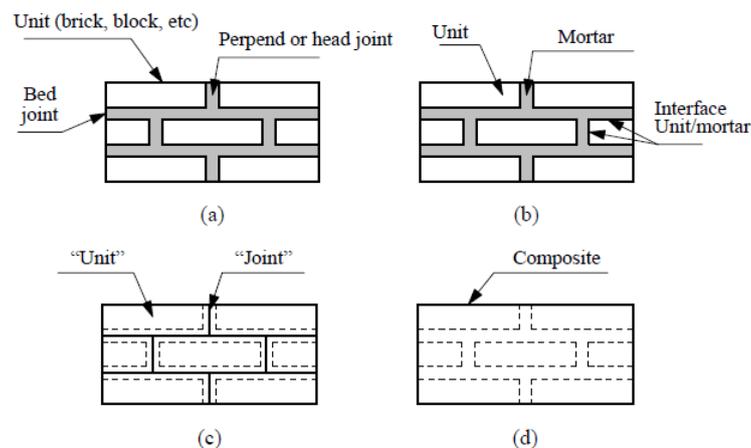


Figure 2.1 Modeling strategies for masonry structures: (a) masonry sample; (b) detailed micro-modeling; (c) simplified micro-modeling; (d) macro-modeling.

Figura 1. Tipos de modelamiento de la albañilería no confinada.

Fuente: Tesis de doctorado Universidad Tecnológica de Delft. (Lourenço, 1996)

MODELO CONSTITUTIVO DE DAÑO PLÁSTICO DEL CONCRETO

Según Oller S. (1988), se conoce que el fenómeno de fisuración de materiales cuasi frágiles como el concreto ocurre a bajos niveles de tracción debido a la pérdida de cohesión, entre las partículas, que ha sufrido el material debido a la micro fisuración previa.

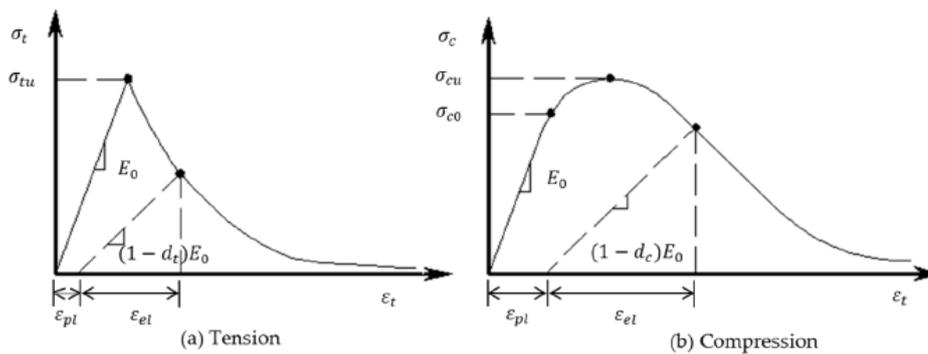
Se sabe, según resultados experimentales, que el concreto tiene un comportamiento no lineal, el cual se debe a un proceso de micro fisuración. La micro fisuración se produce por el deslizamiento entre las partículas del material debido a pérdida de cohesión. Se puede relacionar el comportamiento del material con un fenómeno elasto plástico donde la deformación puede desdoblarse en una componente recuperable y otra deformación permanente. Por lo tanto, se puede considerar la energía disipada como una medida del daño (Daño plástico).

Mohammad Bolhassani (2015) El modelo constitutivo Concrete Damaged Plasticity (CDP) se ha desarrollado para predecir el comportamiento del concreto y otros materiales cuasi frágiles como la roca y el mortero bajo cargas cíclicas. Las grietas en tensión o el aplastamiento en compresión son los principales modos de falla de este modelo. El modelo CDP asume que la respuesta de compresión y tracción uniaxial del concreto se caracteriza por el daño plástico.

Se realizará el análisis numérico del comportamiento en compresión axial de la albañilería no confinada elaborada con ladrillos artesanales utilizando el modelo CDP el cual está

disponible en la biblioteca del programa ABAQUS. Luego se hará la comparación de los resultados del análisis numérico con los resultados del análisis experimental.

El modelo de daño plástico del concreto puede ser utilizado para simular el comportamiento no lineal de materiales frágiles tales como el concreto cerámicos también la albañilería. Los modos de falla en este modelo son la fractura en tracción o el aplastamiento en compresión. Las relaciones esfuerzo deformación y los parámetros correspondientes de daño utilizados se han tomado que las propuestas de Lubliner, ver Gráfica 1.



Gráfica 1. Respuesta del concreto a carga axial (Fuente: Manual ABAQUS)

Según Y. Tao (2015), el comportamiento no lineal del hormigón se atribuye al proceso de daño y plasticidad. El proceso de daño se puede atribuir microfisuración, pérdida de cohesión, etc. El comportamiento plástico se puede caracterizar por varios fenómenos como la deformación por ablandamiento, deterioro progresivo y expansión volumétrica entre otros. Estos conducen a la reducción de la resistencia y rigidez del concreto.

El daño generalmente se caracteriza por la degradación de la rigidez. En ABAQUS se introduce un modelo de daño a escala isotrópica para describir la degradación de la rigidez, que se puede representar mediante la ecuación 1, bajo carga uniaxial:

$$\sigma = (1 - d)E_0(\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (1)$$

Donde σ , ε , ε^{pl} representan, respectivamente, esfuerzo, deformación total y deformación plástica; E_0 es la rigidez inicial donde no hay daño, d es el factor de daño que caracterizan la degradación de la rigidez elástica y tiene valores en un rango entre 0 y 1, desde el estado sin daño hasta el estado completamente dañado. La rigidez degradada E está dada por:

$$E = (1 - d)E_0 \quad (2)$$

Si no hay daño en el concreto la ecuación 1 se reduce a:

$$\sigma = E_0(\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (3)$$

Donde la deformación plástica ε^{pl} es la misma que la deformación considerada sin degradación de rigidez ε^p .

Los modelos de degradación de la rigidez pueden ser clasificados en dos tipos de acuerdo a la presencia de deformaciones irreversibles o deformaciones plásticas.

Los modelos de degradación elástica son asociadas con la deformación total lo cual implica que no hay deformación plástica ($\varepsilon^p = 0$, donde ε^p es la deformación plástica con degradación de la rigidez), y la rama de descarga pasa por el origen en este caso la ecuación 1 se puede reescribir en la siguiente manera:

$$\sigma = (1 - d)E_0\varepsilon \quad (4)$$

Donde ε es la deformación total. Lubliner (1989), enfatiza que el concepto de degradación elástica está asociado con la deformación total, sin tomar en cuenta algún criterio de daño.

El otro tipo de modelo de degradación de la rigidez considera una degradación plástica asociado con una deformación plástica $\bar{\varepsilon}^p$ en lugar de la deformación total ε que se utiliza en el modelo de degradación elástica tal como se puede ver en la ecuación 5.

Lo cual significa que existe una deformación plástica/deformación irreversible después de que se ha producido el daño (por lo que la deformación plástica con degradación de la rigidez $\bar{\varepsilon}^p \neq 0$, ver Gráfica 2 (a) en este caso la ecuación 1 se puede reescribir como:

$$\sigma = (1 - d)E_0(\varepsilon - \bar{\varepsilon}^p) \quad (5)$$

Lubliner propuso un modelo simplificado de daño donde la degradación plástica ocurre solamente en el rango de ablandamiento y la rigidez es proporcional a la cohesión del material.

$$\frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_{max}} = 1 - d \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{c}{c_{max}} \quad (7)$$

Donde c es la cohesión en el criterio de fluencia, el cual es proporcional al esfuerzo y c_{max} es proporcional a la resistencia del concreto. Bajo tracción o compresión uniaxial la ecuación 7 se reduce a:

$$d = 1 - \frac{\sigma}{f} \quad (8)$$

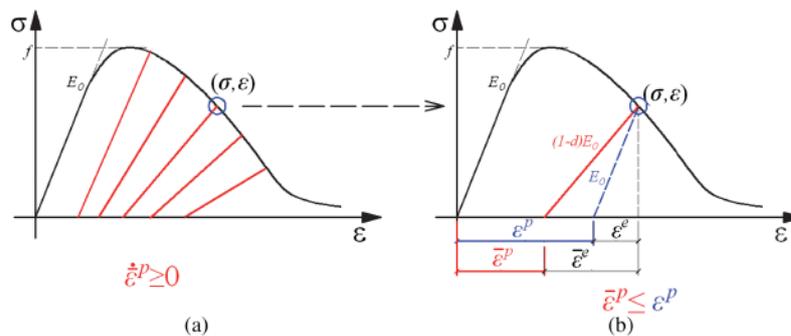
Donde f puede ser la resistencia a la tracción o compresión del concreto. Basado en la geometría, en la Gráfica 2 (b) $\bar{\epsilon}^p$ puede ser relacionada con el factor de daño de la siguiente manera:

$$\bar{\epsilon}^p = \epsilon^p - \frac{d}{1-d} \frac{\sigma}{E_0} \quad (9)$$

Sustituyendo la ecuación 7 en la ecuación 8 se obtiene

$$\bar{\epsilon}^p = \epsilon - \frac{\sigma}{E_0} - \frac{f - \sigma}{E_0} = \epsilon - \frac{f}{E_0} \quad (10)$$

Dónde f/E_0 es la deformación elástica en el punto máximo. Luego de alcanzar este valor máximo, permanece constante.

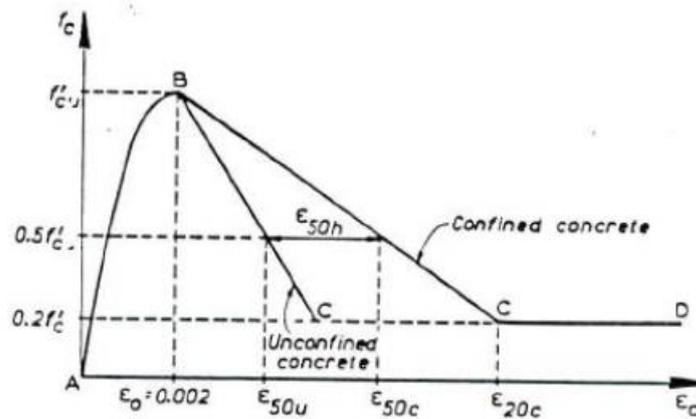


Gráfica 2. Modelo de daño plástico

(a) Degradación de deformación plástica (b) Daño (Fuente: Y. Tao)

El comportamiento en compresión se puede caracterizar ya sea a partir de procedimientos experimentales o modelos constitutivos existentes. Uno de ellos es el modelo de Kent y Park. Este modelo está compuesto en el primer tramo por una parábola de segundo grado cuyo máximo valor corresponde al esfuerzo f_c y una deformación unitaria del concreto ϵ_0 de 0.002, como se muestra en la Gráfica 3. El segundo tramo del modelo es lineal, y el

esfuerzo decrece hasta alcanzar el 20% de f'_c , siendo la pendiente de este tramo dependiente de la resistencia del concreto, de la relación del volumen de refuerzo transversal con respecto al volumen del núcleo de concreto confinado y el espaciamiento de estribos.



Gráfica 3. Modelo de Kent DC, & Park R.

Para $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Para $0.002 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{20c}$

$$f_c = f'_c [1 - z(\varepsilon_c - 0.002)] \quad (12)$$

Donde:

$$z = \frac{\tan \theta}{f'_c}$$

$$\tan \theta = \frac{0.5f'_c}{\varepsilon_{50c} - 0.002}$$

$$\varepsilon_{50c} = \varepsilon_{50} + \varepsilon_{50h}$$

ε_{50c} es la deformación del concreto confinado cuando está al 50% de su resistencia

CAPÍTULO II: PROGRAMA EXPERIMENTAL

En el programa experimental, se realizaron ensayos de propiedades físicas y mecánicas de las unidades, del mortero, de prismas y muretes.

En cuanto al mortero se decidió hacer dos tipos de mezcla, uno con relación en volumen de 1 en 3 y otra mezcla con relación en volumen 1 en 5. Para los ensayos de la albañilería, se elaboraron prismas para ensayos de resistencia a la compresión axial y muretes para ensayos de compresión diagonal.

Se muestra a continuación los diagramas de las actividades del plan de trabajo experimental para los ensayos de especímenes de albañilería y de sus componentes: mortero y ladrillo, ver Figura 2.

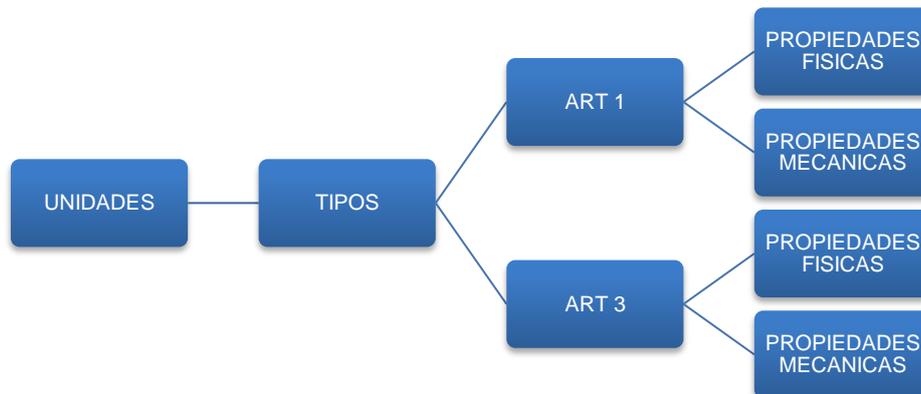


Figura 2. Diagrama de actividades de ensayos de unidades de albañilería

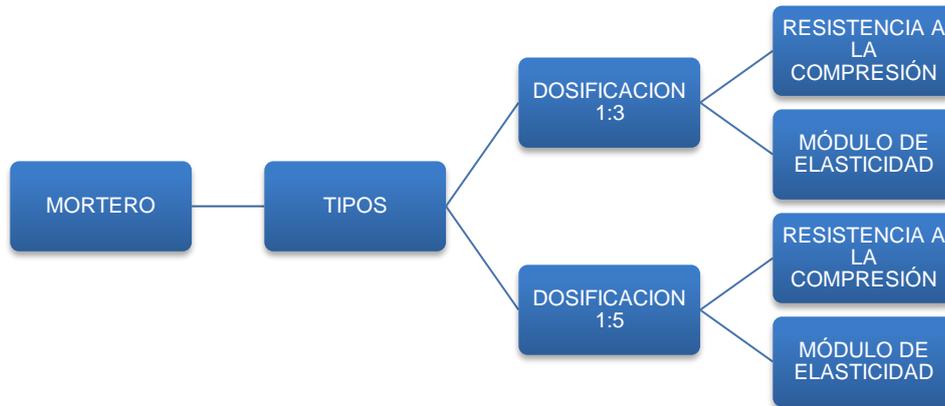


Figura 3. Diagrama de actividades de ensayos de mortero

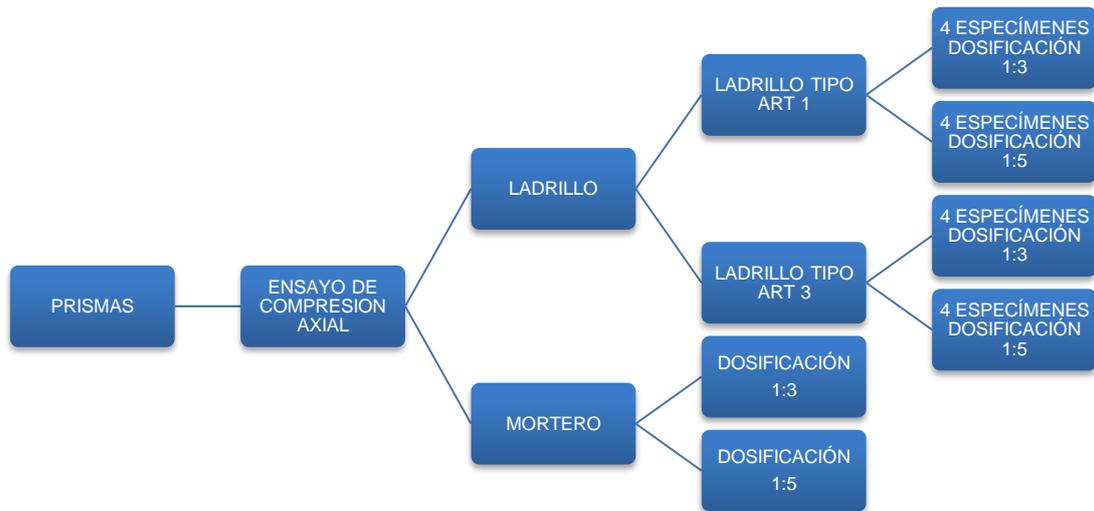


Figura 4. Diagrama de actividades de ensayos de compresión axial en prismas

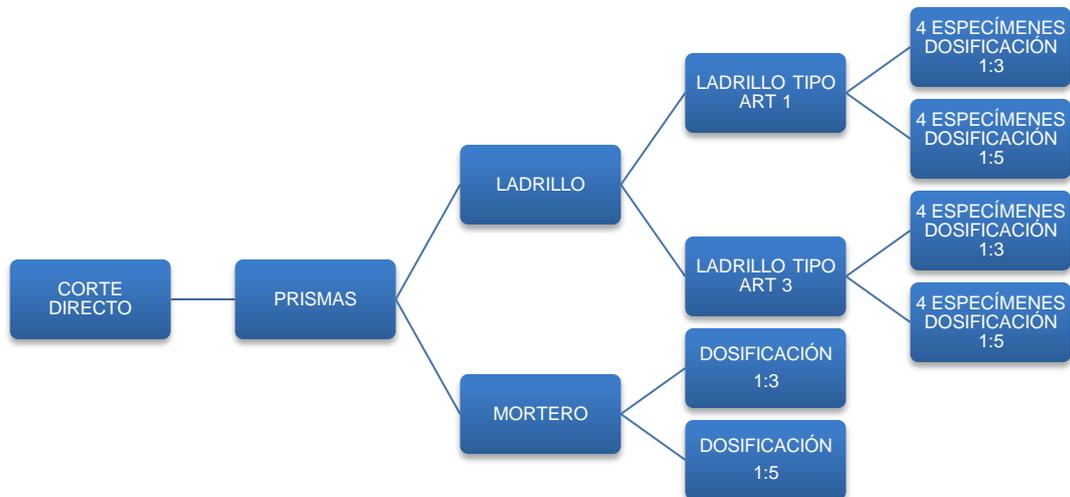


Figura 5. Diagrama de actividades de ensayos de corte directo

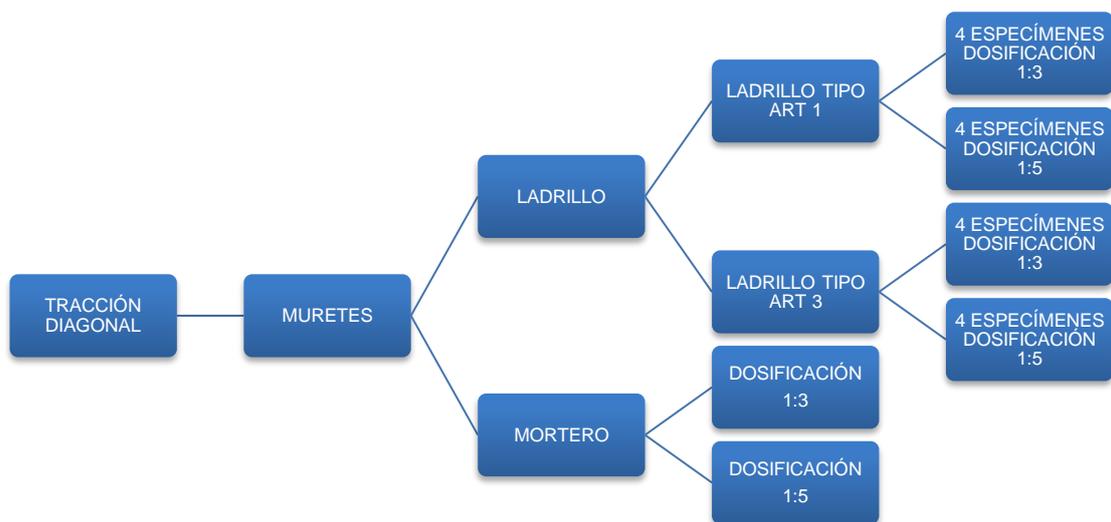


Figura 6. Diagrama de actividades de ensayos tracción diagonal

2.1. ACERCA DE LA MUESTRA ESTUDIADA

La albañilería es un material muy usado en edificaciones de vivienda en la ciudad de Lima (Figura 7). Aquí puede apreciarse que la albañilería es utilizada en bloques sólidos, así como en bloques tubulares o huecos. Esta mampostería informal, muchas veces por la configuración de la estructura adicionalmente a la variable material, posee problemas de irregularidad en planta y elevación.

La muestra contiene ladrillos artesanales procedentes de fábricas del cono norte (Puente Piedra) y del cono este (Lurigancho) de la ciudad de Lima, como se muestra en la Figura 8. Estas ladrilleras fueron seleccionadas contemplando su productividad.



Figura 7. Viviendas de albañilería en Lima

De acuerdo con los estudios realizados por convenios entre CISMID y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, ha sido posible conocer los porcentajes de edificaciones que utilizan la mampostería como material predominante en el sistema estructural. Los datos recopilados son presentados en la Tabla 1, donde puede apreciarse que la mampostería representa en promedio el 81.4% de las viviendas en Lima. En la Tabla 2 se identifican los ladrillos según su procedencia.

Tabla 1 Uso de la albañilería en Lima (Fuente: CISMID –MVCS)

DISTRITO	% VIVIENDAS DE ALBAÑILERÍA
La Molina	95%
Chorrillos	90%
Villa El Salvador	89%
Comas	91%
Puente Piedra	80%
San Juan de Lurigancho	95%
Cercado de Lima	75%
Ventanilla	50%
Breña	68%

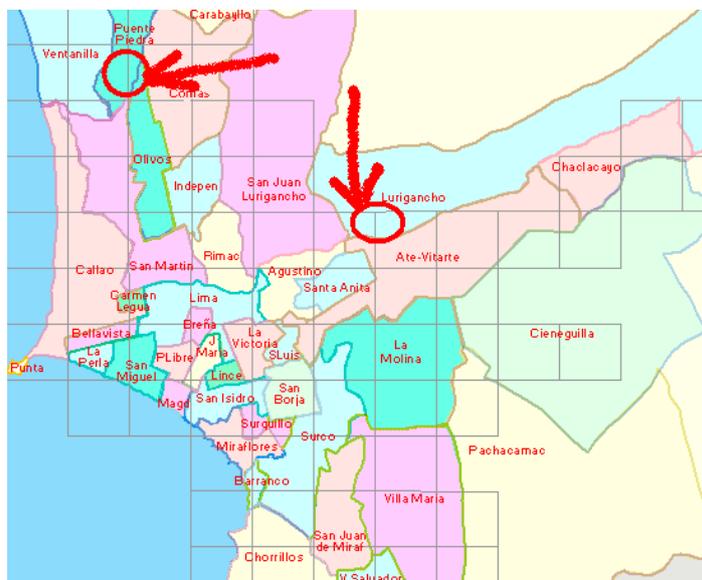


Figura 8. Ubicación de puntos de producción de unidades artesanales

Tabla 2 Identificación de las unidades según su procedencia

IDENTIFICACIÓN	FABRICACIÓN-PROCEDENCIA
ART -01	Artesanal-Lurigancho
ART -03	Artesanal-Puente Piedra Comas

La Figura 9 muestra unidades de cada una de las dos procedencias, donde se puede apreciar que estas presentan zonas de color blanquecino, aun cuando se hizo una selección de las unidades.



Figura 9. Unidades artesanales usadas

2.2. ENSAYO EN UNIDADES

Los ensayos de las unidades se realizaron siguiendo las indicaciones de la norma NTP 399.613 2005 UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería.

2.2.1. Propiedades físicas de las unidades

Se seleccionaron las unidades de la muestra, eliminando aquellas que presentaban deterioros, para así evitar la distorsión de resultados por este parámetro. Se nota variaciones en el color lo cual muestra que la cocción no es uniforme. En la se muestran las medidas promedio de cada uno de los tipos de ladrillos.

Considerando las propiedades físicas de las unidades, se realizaron ensayos de succión, absorción y densidad de acuerdo con las normas ASTM y las normas NTP. Ver Figura 10.

Tabla 3. Medidas promedio de ladrillos

IDENTIFICACION	L(cm)	A(cm)	H(cm)
ART01	19.97	11.48	9.00
ART03	16.75	11.21	9.11

La succión está relacionada con la adherencia de la unión del mortero-ladrillo, pues con una succión excesiva no se logra una unión adecuada, esto debido a que el ladrillo absorbe de manera rápida el agua del mortero, endureciendo y deformando a este mismo, obteniendo uniones de baja resistencia y permeables al agua.

La absorción es una forma de medir la impermeabilidad que la unidad de albañilería posee, en la norma se especifican los valores máximos a usarse en condiciones de uso que se

utilice el ladrillo bajo constante contacto con agua o terrenos sin recubrimiento (cisternas, jardineras y zonas lluviosas).

En cuanto a la densidad, existe una relación entre las propiedades de los ladrillos y la densidad que estos tienen; se sabe que, a mayor densidad, mayores son las propiedades de resistencia y perfección geométrica de los ladrillos.



Secado de unidades al horno



Ensayo de succión

Figura 10. Ensayos de propiedades físicas de las unidades

Tabla 4. Propiedades físicas de unidades

TIPO DE LADRILLO	SUCCION (g/200cm ²)	ABSORCION (%)	PESO ESPECIFICO
ART-01	80.70	15.48	1.859
ART-03	99.39	15.27	1.742

La Tabla 4 presenta los resultados de los ensayos de unidades mostrando sus propiedades físicas. Debe notarse que los valores de los ensayos muestran mayor dispersión en las muestras de unidades artesanales que en el caso de ladrillos industriales.

2.2.2. Propiedades Mecánicas de las Unidades

Ensayos de Compresión en unidades:

Por cada tipo de ladrillo se realizaron ensayos de compresión en diez (10) unidades para determinar la resistencia a la compresión f'_b tal como se muestra en la Figura 11, para el cálculo de la resistencia se ha considerado el área bruta de la unidad. Se obtuvieron valores entre 57 kg/cm^2 y 138 kg/cm^2 tal como se ve en la Tabla 9. Las unidades con mayor peso específico presentan mayor resistencia a la compresión.



Refrendado de unidades para ensayo de compresión



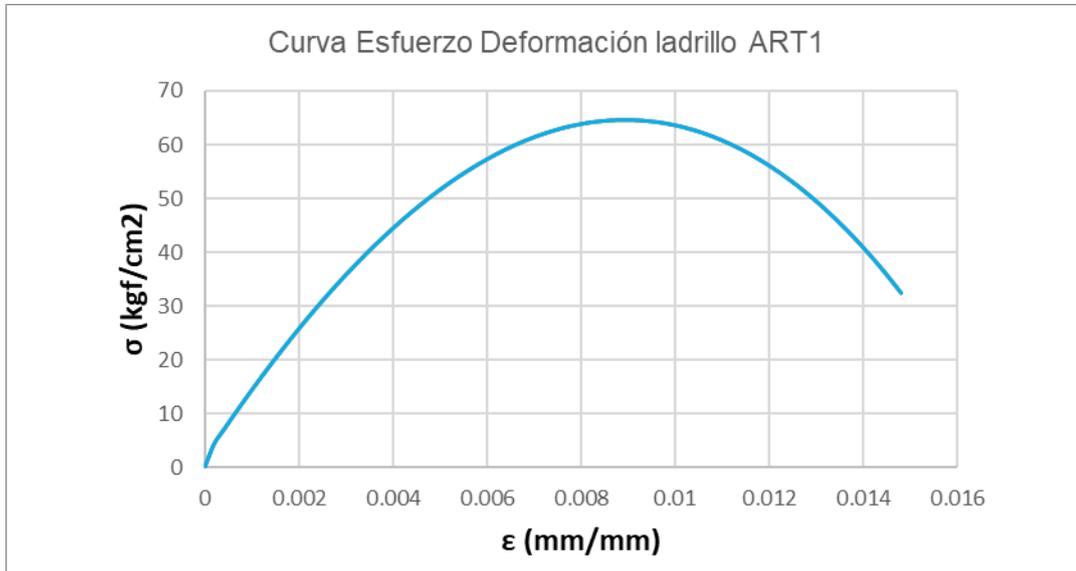
Ensayo de compresión de unidades

Figura 11. Ensayo de compresión de unidades

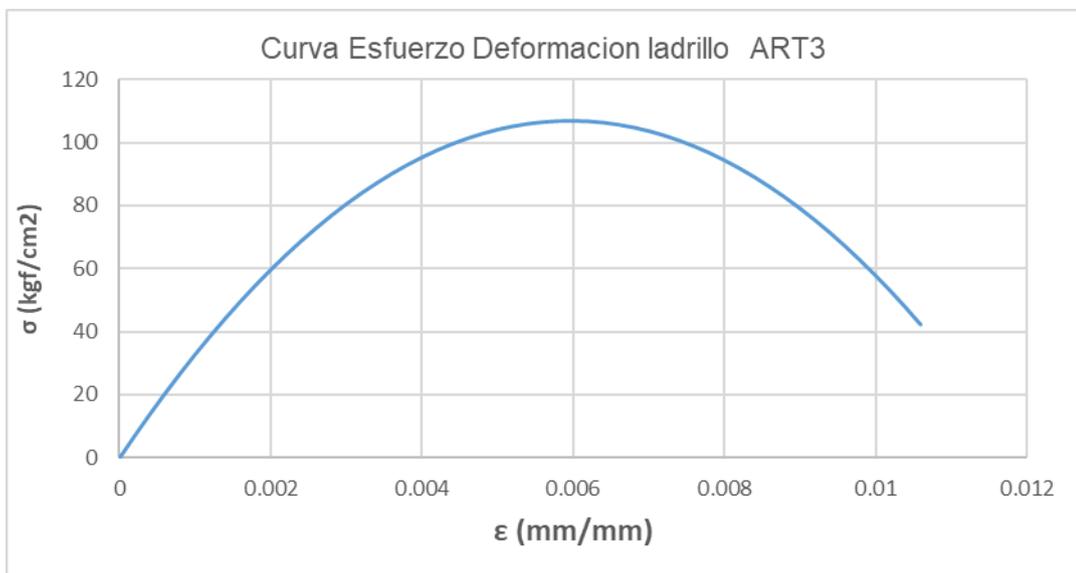
Tabla 5. Resultados de ensayos de compresión en unidades

IDENTIFICACION	L(cm)	A(cm)	H(cm)	AREA (cm ²)	F'b(kg/cm ²)	PROMEDIO
ART01-U01	20.50	11.20	9.00	229.60	69.2	72.5
ART01-U02	20.10	11.50	9.00	231.15	66.5	
ART01-U03	20.30	11.30	9.10	229.39	81.3	
ART01-U04	20.00	12.00	9.00	240.00	72.3	
ART01-U05	20.50	12.00	9.10	246.00	73.3	
ART03-U01	21.40	12.10	9.50	258.94	95.5	124.6
ART03-U02	21.40	11.60	9.50	248.24	94.8	
ART03-U03	21.40	11.60	9.40	248.24	118.2	
ART03-U04	21.10	11.40	9.40	240.54	176.6	
ART03-U05	21.30	11.80	9.30	251.34	138.1	

Se ha obtenido la curva esfuerzo deformación de cada uno de los dos tipos de ladrillos ART1 (Ver Gráfica 4) y ART3 (Ver Gráfica 5).



Gráfica 4. Curva esfuerzo deformación de ladrillo tipo ART1



Gráfica 5. Curva esfuerzo deformación de ladrillo tipo ART3

Ensayos de tracción en unidades:

Para determinar el comportamiento para esfuerzos de tracción de las unidades se realizaron ensayos de flexión con carga a los tercios. Previo al ensayo se prepararon las unidades para tener superficies planas donde colocar los rodillos de apoyo y los rodillos para aplicar las cargas tal como se ve en la Figura 12.



Figura 12 Unidades para ensayo de flexión

El ensayo se realizó en una maquina universal de 50 toneladas que tiene un dispositivo para realizar el ensayo de flexión. En la Figura 13 se puede observar el espécimen apoyado en los rodillos los cuales están a 2.5 cm de cada borde para evitar fallas locales. Los rodillos que transmiten la carga fueron colocados en cada tercio de la luz libre.



Figura 13 Esquema del ensayo de flexión

En todos los ensayos la falla se produjo dentro de la zona del tercio central que es la zona de máximo momento tal como se ve en la Figura 14. Los resultados de ensayo se muestran en la Tabla 6.

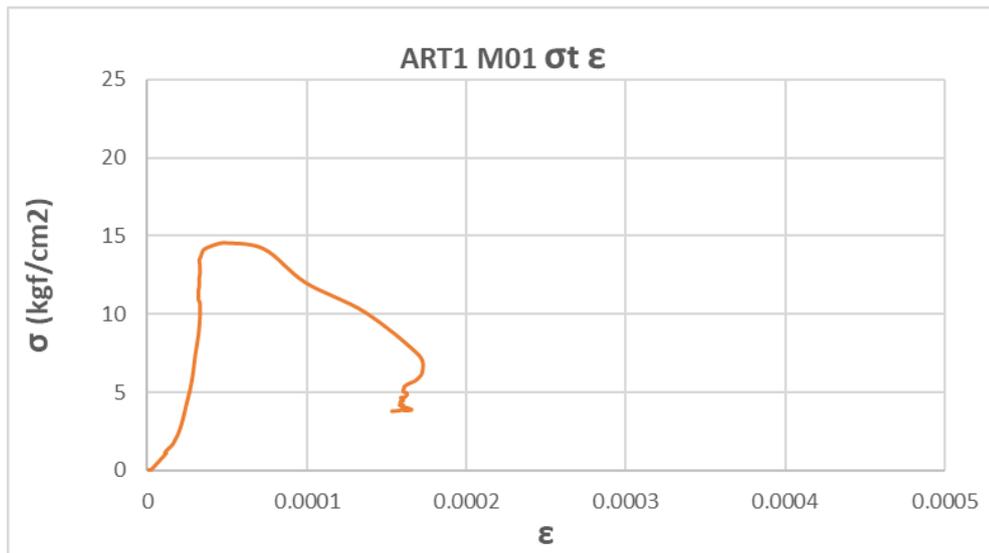


Figura 14 Fisura en ladrillo

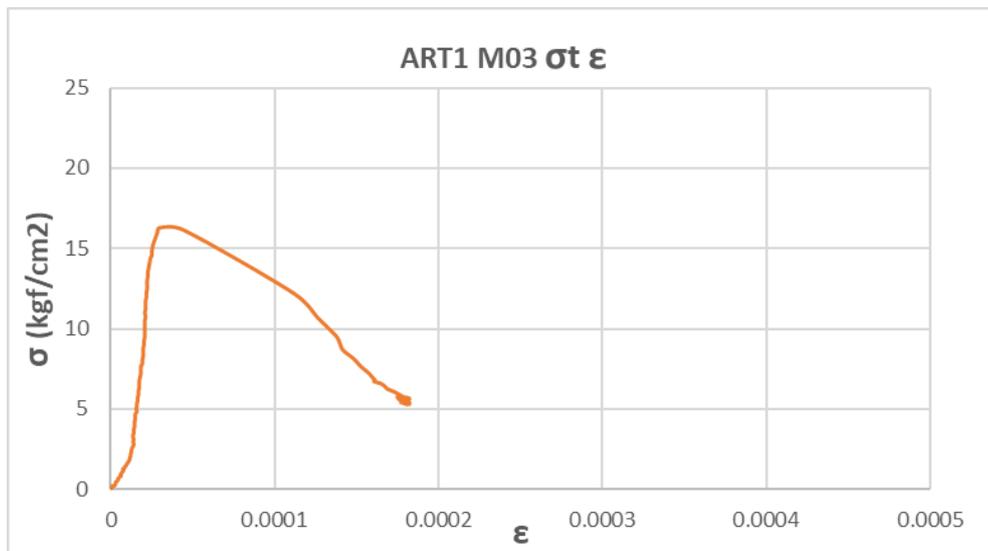
Tipo de ladrillo	ART3-M02	ART3-M03	ART1-M01	ART1-M03
Peso específico (kgf/m ³)	1814	1396	1802	2204
P(kgf)	777.1	627.0	498.6	578.6
Resistencia a la tracción (kgf/cm ²)	23.8	17.7	14.5	16.3

Tabla 6. Resultados de ensayo de flexión en las unidades

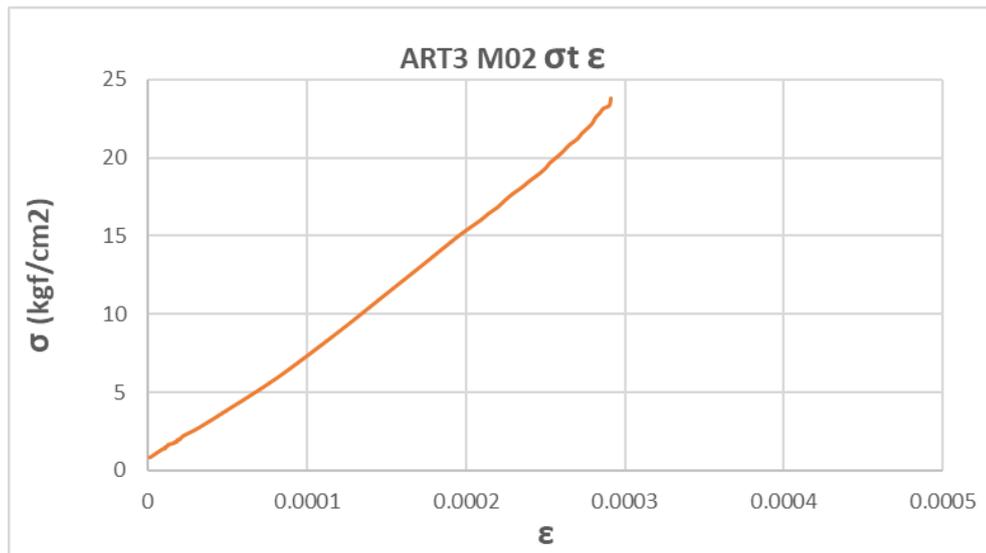
Se obtuvo la curva esfuerzo deformación en tracción para cada ensayo. En el caso del ladrillo tipo ART1, se obtuvieron las curvas para la muestra ART1-M01 (Gráfica 6) y para la muestra ART1-M03(Gráfica 7). En el caso del ladrillo tipo ART3, se obtuvieron las curvas para la muestra ART3-M02 (Gráfica 8) y para la muestra ART3-M03(Gráfica 9).



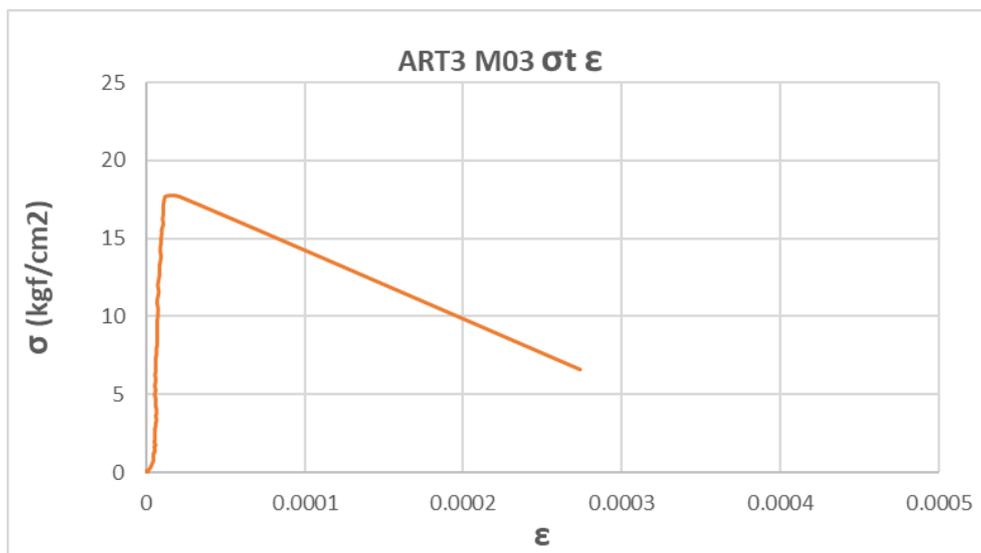
Gráfica 6. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART1-M01



Gráfica 7. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART1-M03



Gráfica 8. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART3-M02



Gráfica 9. Curva esfuerzo deformación en tracción de ladrillo ART3-M03

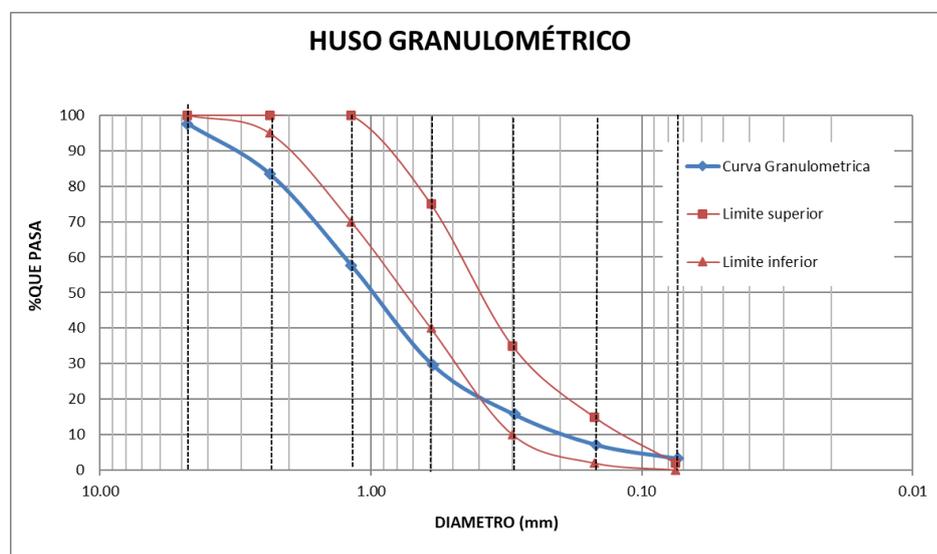
2.3. ENSAYOS EN MORTEROS

Los ensayos de mortero se realizaron siguiendo las indicaciones de la norma NTP 399.610:2013 UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Especificación normalizada para morteros.

El mortero está formado por una mezcla de aglomerante y agregado fino a la cual se le añade suficiente agua para que proporcione una mezcla trabajable, adhesiva y sin segregación del agregado.

Se obtuvo la arena de una cantera de la zona de Puente Piedra la cual abastece a la zona del cono norte de Lima, la granulometría de este agregado fino es variada pero no cae dentro del huso granulométrico indicado por la norma para morteros, no se hizo correcciones para representar condiciones reales de construcción ver Gráfica 10. Las propiedades físicas de la arena se muestran en la Tabla 7

En todos los casos el cemento utilizado fue Portland tipo I y agregado fino. Mientras se construían los prismas y muretes, se fabricaron probetas por cada tipo de mortero. Estas probetas fueron curadas en agua y después de cumplir 28 días de edad fueron ensayadas a compresión axial, ver Figura 15 y Gráfica 11. Los resultados de los ensayos de compresión se muestran en la Tabla 8. Se utilizaron dos tipos de mortero sin cal y con proporción volumétrica cemento-arena 1:3 y 1:5



Gráfica 10. Curva granulométrica de la arena

Tabla 7. Propiedades de la arena

P.E	2200.00	kg/m ³
P.U.S	1402.51	kg/m ³
P.U.C	1560.98	kg/m ³
M.F	3.09	%
%Hum	1.36	%
%Abs.	2.13	%

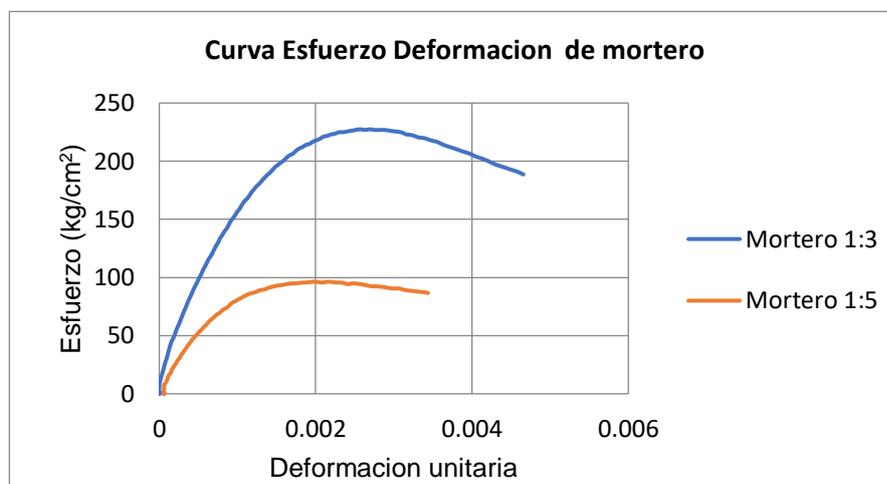


Especímenes de mortero



Ensayo de compresión en cubos de mortero

Figura 15. Ensayo de resistencia a la compresión en cubos de mortero



Gráfica 11. Curvas esfuerzo deformación de morteros

Tabla 8. Resultados de ensayos de compresión de morteros

Tipo de mortero	f'_j (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Mortero 1:3	228	189,705
Mortero 1:5	93	140,068

2.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE PRISMAS

El espécimen para determinar la resistencia a la compresión de la albañilería consiste en un prisma formado por unidades asentadas una sobre otras. La esbeltez de los especímenes varía entre 4 y 4.7 y se les hizo la corrección respectiva indicada en la norma.

Antes del asentado, las unidades fueron seleccionadas eliminando aquellas que presentaban fisuras, o estaban mal cocidas, para posteriormente limpiarlas. Las juntas horizontales de mortero tuvieron un grosor nominal de 1 cm. Este grosor fue controlado mediante un escantillón y la verticalidad fue controlada con una plomada. Antes del ensayo se aplicó un refrendado para corregir la irregularidad superficial de la albañilería.

Luego de 28 días de su elaboración se inició los ensayos de resistencia a la compresión según la norma NTP 399.605 2013 UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Método de ensayo para la determinación de la resistencia en compresión de prismas de albañilería. El equipo de ensayo está formado por una máquina de compresión de 300 ton y un sistema de adquisición de datos, ver la Figura 16. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 9.



Máquina de compresión



Sistema de adquisición de datos

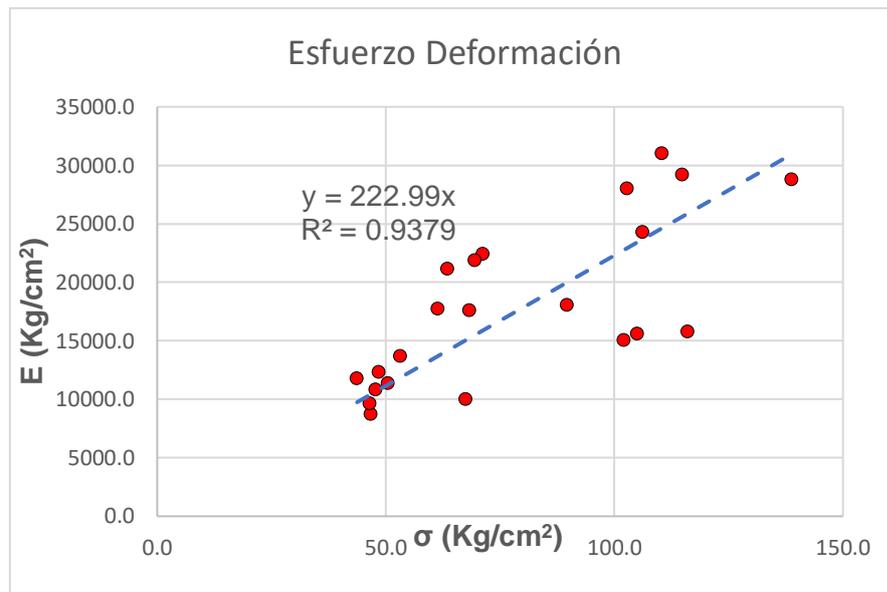
Figura 16. Equipo de ensayo

Para los prismas elaborados con ladrillo tipo ART1 se ha obtenido el valor promedio de resistencia a la compresión de 66 kgf/cm². Para los prismas elaborados con ladrillo tipo ART3 se ha obtenido el valor promedio de resistencia a la compresión de 107.9 kgf/cm².

Se hizo un análisis estadístico para ver la variabilidad de los datos, se quitaron valores atípicos utilizando diagramas de caja y bigote, luego se ha obtenido mediante análisis de regresión de los datos experimentales una expresión para relacionar el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de los prismas:

$$E = 222.99 f_m$$

Dicha correlación se muestra en la Gráfica 12. En la Figura 17 se observan tipos de falla de prismas.



Gráfica 12. Correlación entre el módulo de elasticidad y esfuerzo de compresión axial.



Agrietamiento vertical



Agrietamiento vertical y aplastamiento de las unidades

Figura 17. Tipos de fallas en prismas

Tabla 9. Resumen de ensayos de compresión axial en prismas

Identificación	Esfuerzo (Kgf/cm ²)	E (Kgf/cm ²)
ART1-M01	47.9	10817
ART1-M02	46.8	8708
ART1-M03	68.3	17585
ART1-M04	43.7	11757
ART1-M05	46.5	9640
ART1-M06	48.5	12302
ART1-M07	61.4	17721
ART1-M08	53.3	13660
ART1-M09	67.6	9980
ART1-M10	50.6	11373
ART1-M11	71.3	22407
ART1-M12	63.6	21154
ART1-M13	69.6	21851
ART1-M14	107.8	25949
ART1-M15	106.3	33645
ART1-M16	103.3	38487
ART3-M01	110.5	31003
ART3-M02	115.0	29208
ART3-M03	138.8	28768
ART3-M04	116.1	15768
ART3-M05	68.5	9353
ART3-M06	106.2	24289
ART3-M07	102.8	28023
ART3-M08	89.7	18029
ART3-M09	102.1	15053
ART3-M10	105.1	15602
ART3-M11	130.6	52498
ART3-M12	121.8	48956
ART3-M13	95.6	46958

2.5. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL

Este ensayo fue desarrollado para medir de una manera más precisa la tensión diagonal de la albañilería. El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento indicado en la norma NTP 399.621 2004 (revisada el 2015) UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Método de ensayo de compresión diagonal en muretes de albañilería.

El espécimen se carga en compresión a lo largo de una de sus diagonales, provocando la falla por tensión diagonal en la dirección de aplicación de la carga, ver Figura 18.

Para los muretes elaborados con ladrillo tipo ART1 se ha obtenido el valor promedio de resistencia al corte de 2.92 kgf/cm². Para los muretes elaborados con ladrillo tipo ART3 se ha obtenido el valor promedio de resistencia al corte de 5.29 kgf/cm².



Figura 18. Ensayo de tracción diagonal

Se observaron las fallas típicas de los muretes de mampostería sujetos a compresión diagonal: Falla por tracción diagonal cortando tanto las unidades como el mortero, falla escalonada en las juntas, falla por tracción diagonal y escalonada, ver Figura 19. En la Tabla 10 se muestran los resultados de los ensayos.



Fallas en muretes: (a) por tracción diagonal y (b) tracción diagonal y escalonada.

Figura 19. Fallas en muretes

Tabla 10. Resumen de ensayos de tracción diagonal

Identificación	Esfuerzo (Kg/cm ²)
ART1-14 M1	1.98
ART1-14-M2	3.06
ART1-14-M3	1.86
ART1-14-M4	3.53
ART1-15-M1	3.94
ART1-15-M2	2.43
ART1-15-M3	3.37
ART1-15-M4	3.32
ART3-14-M1	4.78
ART3-14-M2	3.86
ART3-14-M3	4.99
ART3-14-M4	5.54
ART3-15-M1	2.98
ART3-15-M2	5.03
ART3-15-M3	5.03
ART3-15-M4	9.57
ART1-13-M1	4.04
ART1-13-M2	2.85
ART1-13-M3	3.19
ART1-15-M1	1.92
ART1-15-M3	2.44
ART3-13-M1	5.02
ART3-13-M2	5.53
ART3-15-TD1	4.20
ART3-15-TD2	6.63
ART3-15-TD3	5.66
ART3-13-M1	5.60
ART3-13-M2	5.37
ART3-13-M3	6.62

Tabla 11. Resumen de ensayos de propiedades mecánicas

IDENTIFICACIÓN	VALORES PROMEDIO			
	f'm (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	V (kg/cm ²)	f'b(kg/cm ²)
ART1-15	66.0	17939	2.92	56.6
ART3-13	107.9	27962	5.29	115.8

2.6. ENSAYO DE CORTE EN LA UNIÓN LADRILLO MORTERO

Este ensayo nos permite predecir la resistencia de la mampostería ante los esfuerzos tangenciales (fricción y adherencia) en las juntas entre el ladrillo y el mortero. El ensayo se realizó tomando como referencia los trabajos de T. Izquierdo (1989).

Se construyeron especímenes de tres piezas, de las cuales la pieza intermedia fue cortada de tal manera que se tenga otras dos piezas de menor tamaño separadas entre sí por una distancia de S cm, como se muestra en las Figura 20 y Figura 21.

Para estudiar la influencia del mortero se elaboraron especímenes asentados con morteros cuya relación volumétrica cemento arena fue de 1:3 y 1:5, los cuales son utilizados para la construcción de muros portantes según la Norma Técnica E.070.

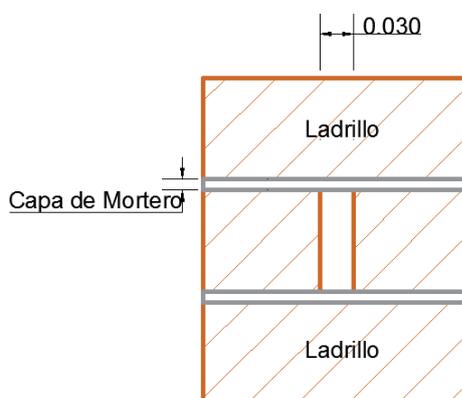


Figura 20. Modelo de espécimen a ensayar en corte directo.

El ensayo consiste en aplicar una carga vertical de preconfiamiento que se mantiene constante y una carga horizontal en el ladrillo intermedio paralela a las juntas de mortero mediante gatas hidráulicas. Se hicieron ensayos para varios niveles de confinamiento, la carga horizontal se incrementó hasta producir la falla por esfuerzo tangencial en cualquiera de las porciones cortadas del ladrillo.

La falla del espécimen ocurre al ceder alguna de las juntas de las porciones de ladrillo, registrándose la carga máxima como la carga de falla.

Según T. Izquierdo (1989), los esfuerzos son calculados sobre el área bruta de asiento del ladrillo, de la siguiente manera:

$$V = \frac{P}{2(A - 1.5d)} \quad (13)$$

Donde:

V = Esfuerzo de corte, en kgf/cm²

P = Carga de falla, en kgf

A = Área bruta del ladrillo empleado, en cm²

d = Profundidad del ladrillo empleado, en cm

El criterio de Mohr-Coulomb representa el comportamiento de materiales frágiles tales como la albañilería, suelos, roca entre otros. Se considera el mecanismo de falla de Mohr-Coulomb, entonces la falla en la unión mortero ladrillo estará dado por la siguiente expresión:

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma \quad (14)$$

Donde:

τ = Esfuerzo resistente por adherencia y fricción

τ_0 = Adherencia

μ = Coeficiente de fricción mortero unidad

σ = Esfuerzo de compresión aplicado en dirección normal a la junta

Equipos para ensayo de corte

- Tres gatas hidráulicas de 20 tf
- Transductores de desplazamiento LVDT
- Sistema de adquisición de datos: un registrador automático de escaneo de datos multi-canal para medidores lectura de tensión, termopares, sensores de temperatura, basadas en transductores de extensómetro

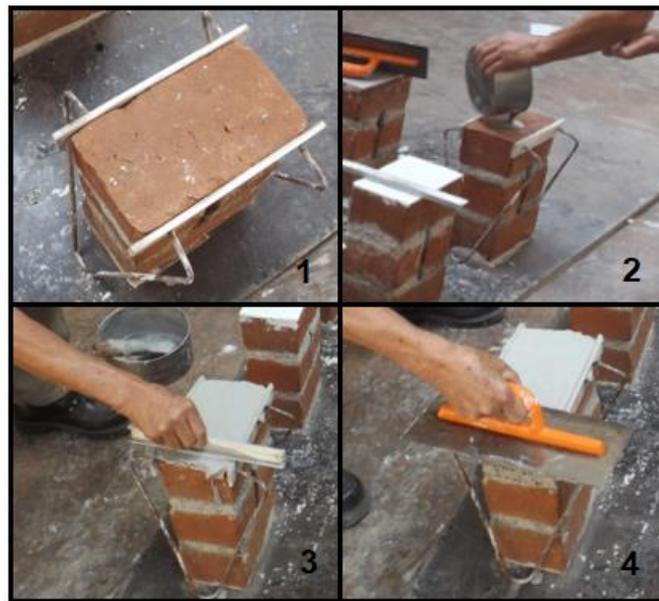


Figura 21. Preparación de especímenes

En dirección vertical, se aplica la carga de confinamiento con una gata hidráulica. Los niveles de preconfinamiento y sus respectivos esfuerzos nominales se muestran a continuación en la siguiente

Tabla 12:

Tabla 12. Niveles de confinamiento

Nivel de confinamiento	N-01	N-02	N-03	N-04	N-05	N-06	N-07	N-08
Esfuerzo (Kg/cm ²)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00

En dirección horizontal, se aplica la carga a cada porción de ladrillo (colocadas al centro del espécimen) de manera creciente hasta el instante en que se produzca el deslizamiento entre el mortero y ladrillo.

Todos los valores de carga fueron registrados en una laptop con ayuda del sistema de adquisición de datos, en la Figura 22 se observa la disposición del sistema de aplicación de carga:

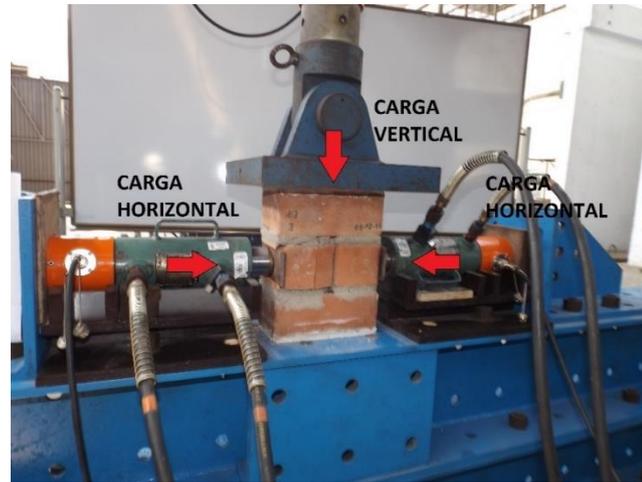


Figura 22. Ensayo de corte directo

Tomando los resultados de los ensayos de corte directo a diferentes niveles de carga de precompresión se ha caracterizado la relación de adherencia entre el mortero y ladrillo mediante una regresión lineal para obtener las expresiones del criterio de falla de Mohr Coulomb ver Gráfica 13. En la Tabla 13 se muestran los resultados de los ensayos de corte directo.

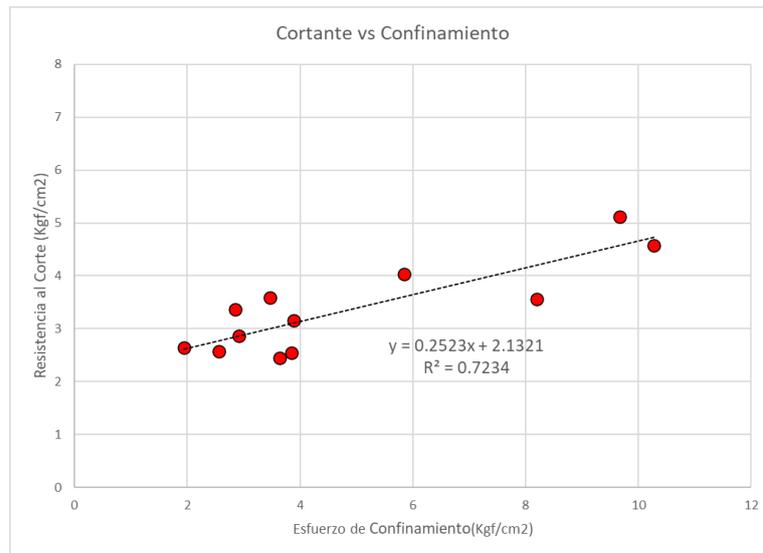
$$V = 2.1321 + 0.2523\sigma \quad (15)$$

Donde:

V = Resistencia al corte por adherencia, en Kgf/cm^2

σ = Esfuerzo de preconfiamiento, en Kgf/cm^2

De donde se puede ver que el ángulo de fricción interna sería $\Phi=14.16^\circ$ y la cohesión es de 2.1321 Kgf/cm^2



Gráfica 13. Correlación entre esfuerzo cortante y esfuerzo de preconfinamiento

Tabla 13. Resultados de ensayos de corte directo

Especimen	Esfuerzo de Preconfinamiento (kg/cm ²)	Esfuerzo cortante (kg/cm ²)
ART3M2-13	9.67	5.12
ART3M3-13	8.04	5.82
ART3M4-13	3.63	2.45
ART3M5-13	2.57	2.57
ART3M6-13	3.47	3.59
ART3M7-13	3.89	3.16
ART3M8-13	5.41	5.65
ART3M1-15	8.20	3.56
ART3M2-15	10.28	4.58
ART3M4-15	1.95	2.64
ART3M5-15	2.85	3.36
ART3M6-15	2.92	2.86
ART3M7-15	3.85	2.55
ART3M8-15	4.53	4.57
ART3M9-15	5.84	4.03

CAPITULO III: MODELO CONSTITUTIVO DE LA ALBAÑILERÍA NO CONFINADA

Para definir el material, inicialmente se debe tener los datos de esfuerzo deformación tanto en compresión como en tracción. Estos se pueden definir a partir de ensayos de laboratorio también se pueden encontrar en la literatura modelos para caracterizar el material. Se puede utilizar el modelo de Kent y Park para el concreto no confinado.

Mediante ensayos de laboratorio mencionados anteriormente se ha determinado el comportamiento en compresión. Luego se definen los parámetros que permiten simular el comportamiento elástico, plástico, el daño y la falla del material.

En la curva esfuerzo deformación en compresión se obtiene la resistencia máxima, el inicio de la zona plástica. Se determina las propiedades mecánicas: módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión.

3.1. MODELO DE DAÑO PLÁSTICO

Para definir la zona de comportamiento plástico se utiliza el criterio de daño plástico del concreto. Consta de parámetros primarios y secundarios. Parámetro primario es la plasticidad, parámetros secundarios son el comportamiento en compresión y en tracción. El primer punto es el final de la zona de comportamiento lineal del material, se considera aproximadamente 40% o 50 % de la resistencia del material (Park considera el 50%). El segundo punto de esta curva es la resistencia máxima del material. Otro parámetro importante es el punto de deformación unitaria correspondiente a la resistencia máxima el cual también se obtiene de la curva esfuerzo deformación (en el modelo de Park se toma como 0.002).

La deformación inelástica se determina mediante la expresión:

$$\varepsilon_{inelastica} = \varepsilon_c - \frac{\sigma}{E} \quad (16)$$

El daño está dado por:

$$d_c = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (17)$$

No se tiene la variación de la rigidez del material (Figura 23), entonces se aproxima mediante la relación entre esfuerzos.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_u} \quad (18)$$

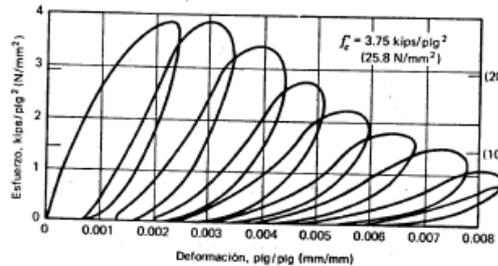


Figura 23. Variación de la rigidez

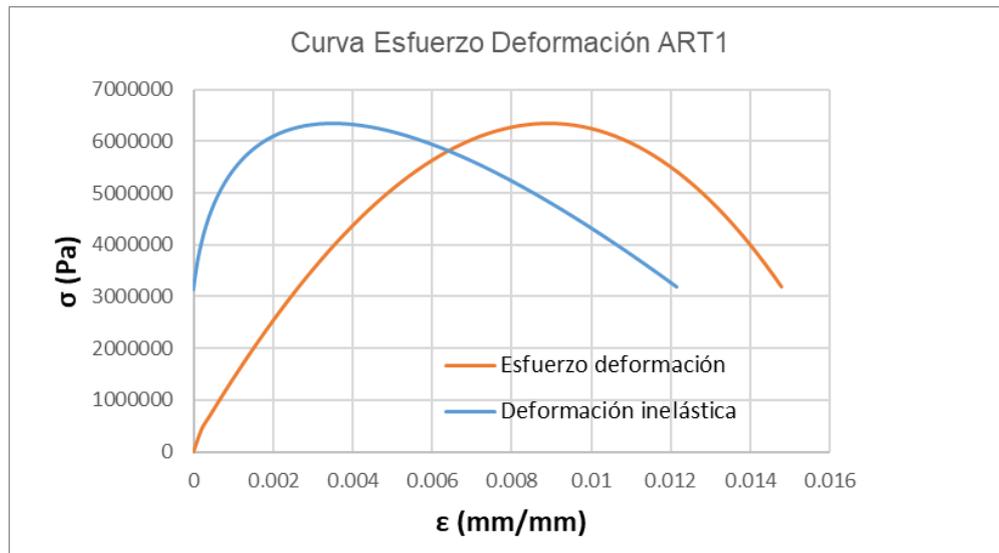
Los cuales son ingresados en el programa como parte de los parámetros de plasticidad del material.

3.2. PARÁMETROS PARA EL MODELO CONSTITUTIVO

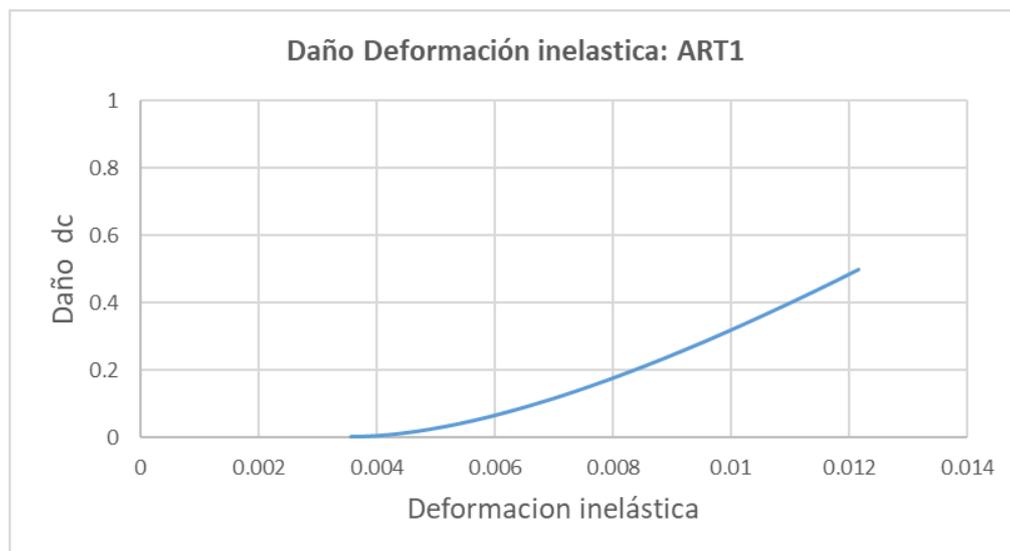
3.2.1. Parámetros para el modelo constitutivo del ladrillo tipo ART1

La curva esfuerzo deformación en compresión del material se ha obtenida experimentalmente, a partir de esta curva se ha obtenido la curva esfuerzo deformación inelástica (Gráfica 14), de ahí se obtiene la curva de daño (Gráfica 15). En la Tabla 14 se muestra los datos correspondientes a la curva esfuerzo deformación inelástica en compresión que se utilizan como datos de entrada en la simulación numérica y en la Tabla 15 se muestran los datos de la curva de daño, los cuales también se utilizan como datos de entrada en la simulación numérica.

Se tiene también la curva esfuerzo deformación σ en tracción del ladrillo tipo obtenida experimentalmente (Gráfica 16), de ahí se obtiene la curva de daño en tracción (Gráfica 17). Al programa se ingresan valores de esfuerzo en Pascal.



Gráfica 14. Curva esfuerzo deformación en compresión ladrillo tipo ART1



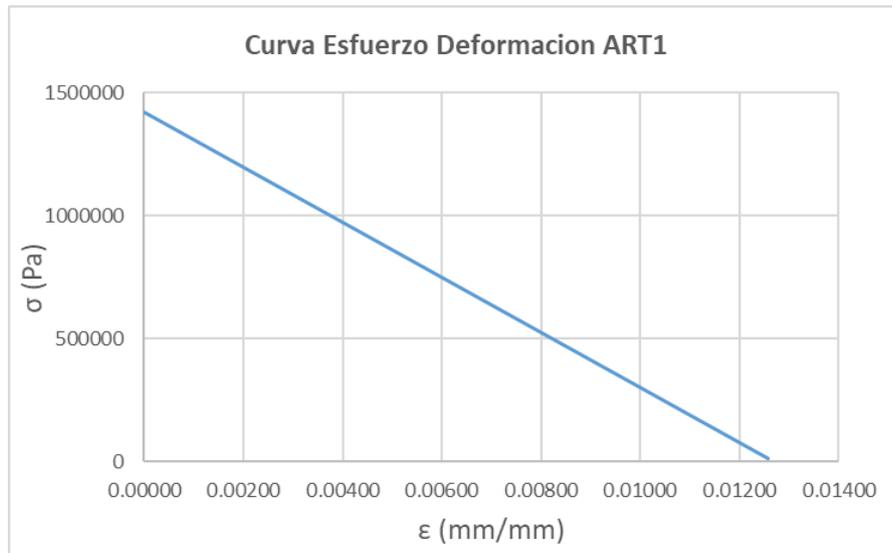
Gráfica 15. Curva de daño en compresión para ladrillo tipo ART1

Tabla 14. Esfuerzo deformación inelástica en compresión, ladrillo tipo ART1

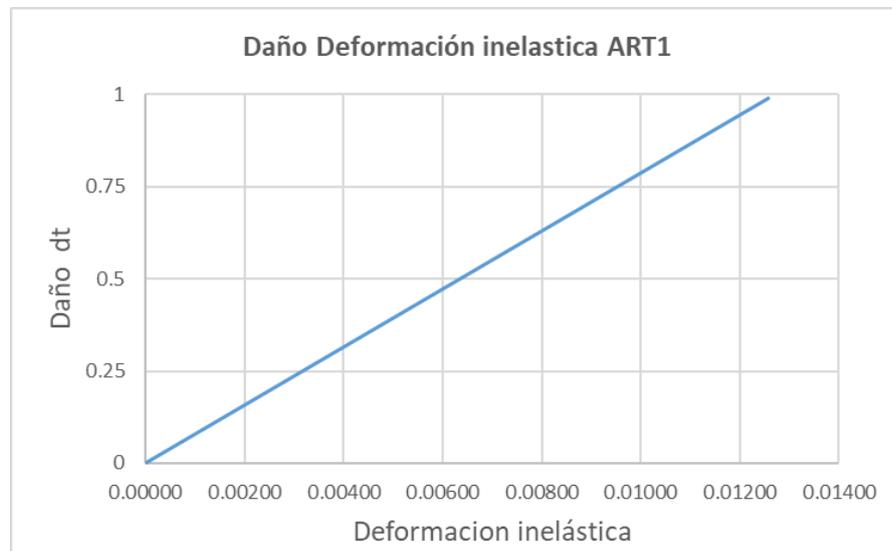
Stress	inelastic strain
3140111.44	0
3331920.79	3.03378E-05
3518288.76	6.54887E-05
3699168.28	0.000105494
3874512.28	0.000150396
4044273.69	0.000200236
4208405.45	0.000255056
4366860.48	0.000314897
4519591.72	0.000379801
4666552.1	0.000449809
4807694.54	0.000524964
4942971.99	0.000605306
5072337.36	0.000690878
5195743.6	0.00078172
5313143.63	0.000877876
5424490.39	0.000979386
5529736.8	0.001086292
5628835.81	0.001198635
5721740.32	0.001316458
5808403.29	0.001439801
5888777.64	0.001568707
5962816.3	0.001703217
6030472.21	0.001843373
6091698.29	0.001989217
6146447.47	0.002140789
6194672.69	0.002298132
6236326.88	0.002461288
6271362.97	0.002630297
6299733.89	0.002805202
6321392.57	0.002986044
6336291.95	0.003172865
6344384.94	0.003365706
6345624.5	0.00356461
6339963.54	0.003769617
6327354.99	0.00398077
6307751.8	0.00419811
6281106.88	0.004421678
6247373.18	0.004651517
6206503.62	0.004887667
6158451.13	0.005130171
6103168.65	0.005379071
6040609.11	0.005634407
5970725.43	0.005896222
5893470.55	0.006164556
5808797.4	0.006439453
5716658.91	0.006720952
5617008.01	0.007009097
5509797.63	0.007303928
5394980.71	0.007605488
5272510.18	0.007913818
5142338.96	0.008228959
5004419.99	0.008550953
4858706.2	0.008879842
4705150.52	0.009215667
4543705.88	0.009558471
4374325.22	0.009908294
4196961.45	0.010265179
4011567.53	0.010629166
3818096.37	0.011000298
3616500.9	0.011378617
3406734.07	0.011764163
3188748.8	0.012156979

Tabla 15. Curva de daño en compresión para ladrillo tipo ART1

dc -ART1	Deformación inelástica
0	0.00356461
0.0008921	0.003769617
0.00287907	0.00398077
0.00596832	0.00419811
0.01016726	0.004421678
0.01548332	0.004651517
0.02192391	0.004887667
0.02949644	0.005130171
0.03820835	0.005379071
0.04806704	0.005634407
0.05907993	0.005896222
0.07125444	0.006164556
0.08459799	0.006439453
0.099118	0.006720952
0.11482187	0.007009097
0.13171704	0.007303928
0.14981091	0.007605488
0.16911091	0.007913818
0.18962445	0.008228959
0.21135895	0.008550953
0.23432182	0.008879842
0.25852049	0.009215667
0.28396238	0.009558471
0.31065489	0.009908294
0.33860545	0.010265179
0.36782148	0.010629166
0.39831038	0.011000298
0.43007959	0.011378617
0.46313652	0.011764163
0.49748858	0.012156979



Gráfica 16. Curva esfuerzo deformación en tracción para ladrillo tipo ART1



Gráfica 17. Curva de daño en tracción para ladrillo tipo ART1

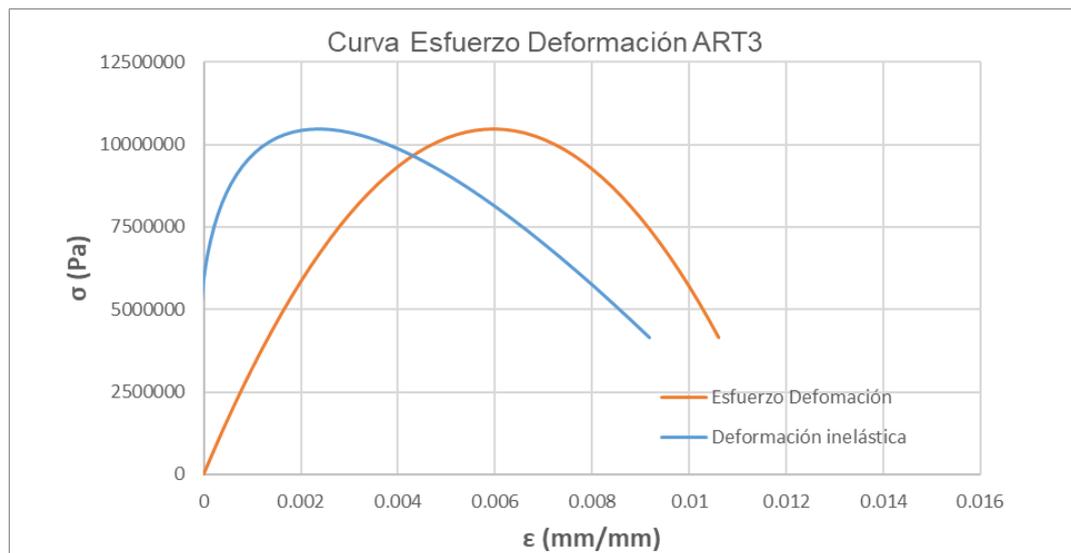
3.2.2. Parámetros para el modelo constitutivo del ladrillo tipo ART3

La curva esfuerzo deformación en compresión del material se ha obtenida experimentalmente, a partir de esta curva se ha obtenido la curva esfuerzo deformación inelástica (Gráfica 18), de ahí se obtiene la curva de daño (Gráfica 19).

En la Tabla 16 se muestra los datos correspondientes a la curva esfuerzo deformación inelástica en compresión que se utilizan como datos de entrada en la simulación numérica y en la

Tabla 17 se muestran los datos de la curva de daño, los cuales también se utilizan como datos de entrada en la simulación numérica.

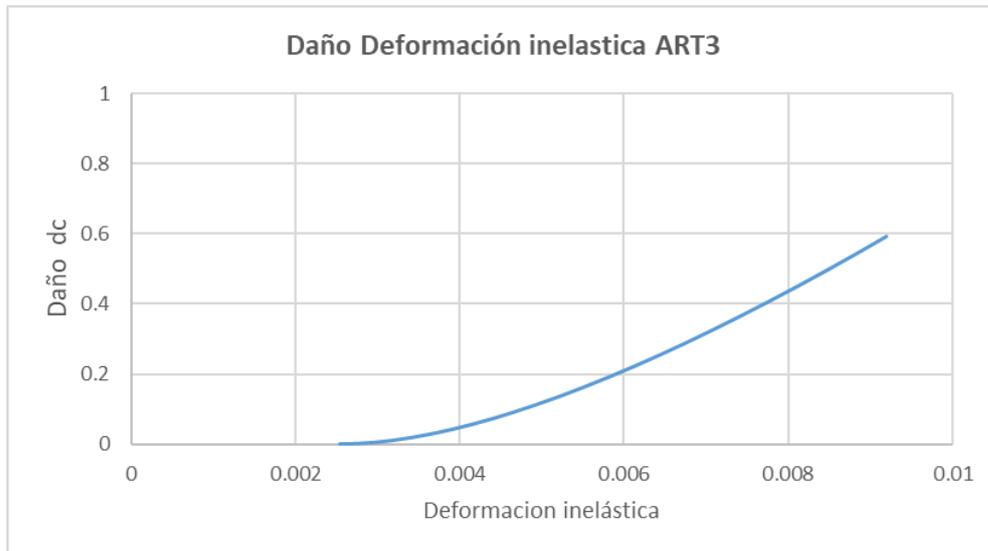
Se tiene también la curva esfuerzo deformación en tracción del ladrillo tipo obtenida experimentalmente (Gráfica 20), de ahí se obtiene la curva de daño en tracción (Gráfica 21). Al programa se ingresan valores de esfuerzo en Pascal.



Gráfica 18. Curva esfuerzo deformación en compresión ladrillo tipo ART3

Tabla 16. Esfuerzo deformación inelástica en compresión, ladrillo tipo ART3

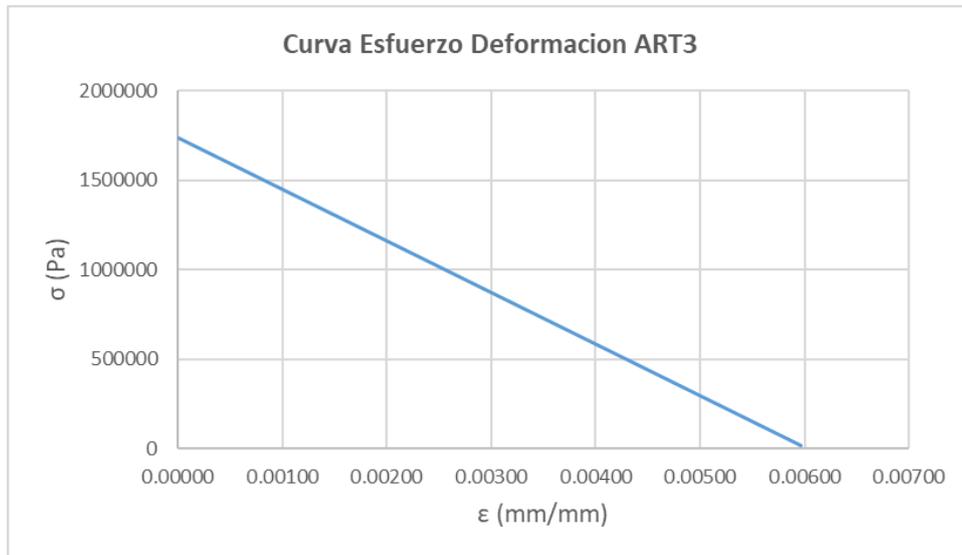
Esfuerzo	Deformación inelástica
8147452.38	0
8989375.93	3.46627E-05
9792075.48	7.70283E-05
10555551	0.000127097
11279802.6	0.000184868
11964830.1	0.000250342
12610633.7	0.000323519
13217213.2	0.000404398
13784568.8	0.000492981
14312700.3	0.000589266
14801607.9	0.000693254
15251291.4	0.000804945
15661751	0.000924339
16032986.5	0.001051436
16364998.1	0.001186235
16657785.6	0.001328737
16911349.2	0.001478942
17125688.7	0.00163685
17300804.2	0.001802461
17436695.8	0.001975775
17533363.3	0.002156791
17590806.9	0.00234551
17609026.4	0.002541932
17588022	0.002746057
17527793.5	0.002957885
17428341.1	0.003177415
17289664.6	0.003404649
17111764.2	0.003639585
16894639.7	0.003882224
16638291.3	0.004132566
16342718.8	0.00439061
16007922.4	0.004656358
15633901.9	0.004929808
15220657.5	0.005210961
14768189	0.005499817
14276496.6	0.005796376
13745580.1	0.006100637
13175439.7	0.006412602
12566075.2	0.006732269
11917486.8	0.007059639
11229674.3	0.007394712
10502637.9	0.007737488
9736377.4	0.008087966
8930892.95	0.008446148
8086184.5	0.008812032
7202252.04	0.009185619



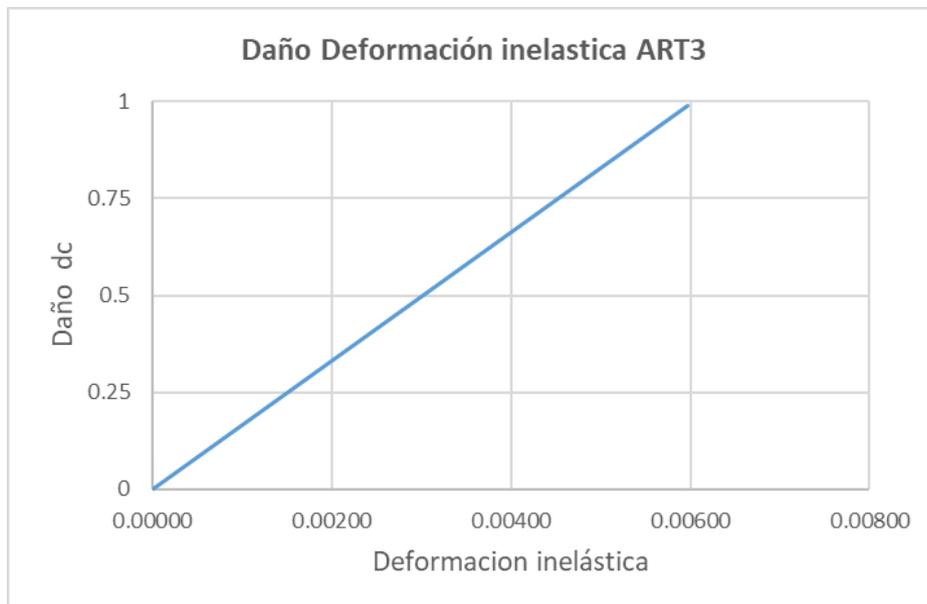
Gráfica 19. Curva parámetro de daño-Deformación inelástica

Tabla 17. Curva de daño en compresión para ladrillo tipo ART3

dc-ART3	Deformación inelástica
0	0.002541932
0.00119282	0.002746057
0.00461314	0.002957885
0.01026095	0.003177415
0.01813626	0.003404649
0.02823905	0.003639585
0.04056935	0.003882224
0.05512713	0.004132566
0.07191241	0.00439061
0.09092519	0.004656358
0.11216546	0.004929808
0.13563322	0.005210961
0.16132848	0.005499817
0.18925123	0.005796376
0.21940147	0.006100637
0.25177921	0.006412602
0.28638444	0.006732269
0.32321717	0.007059639
0.36227739	0.007394712
0.4035651	0.007737488
0.44708031	0.008087966
0.49282301	0.008446148
0.54079321	0.008812032
0.5909909	0.009185619



Gráfica 20. Curva esfuerzo deformación en tracción ladrillo tipo ART3



Gráfica 21. Curva de daño en tracción ladrillo tipo ART3

3.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para la simulación numérica se ha utilizado el programa ABAQUS 6.14. Se hizo uso del módulo PART para crear el objeto ladrillo. Se consideró las siguientes dimensiones, 20 cm de largo, 11.5 cm de ancho y 11 cm de alto para crear el objeto tridimensional deformable bajo cargas al cual se le denominó ladrillo11x20 el cual se puede ver en la Figura 24.

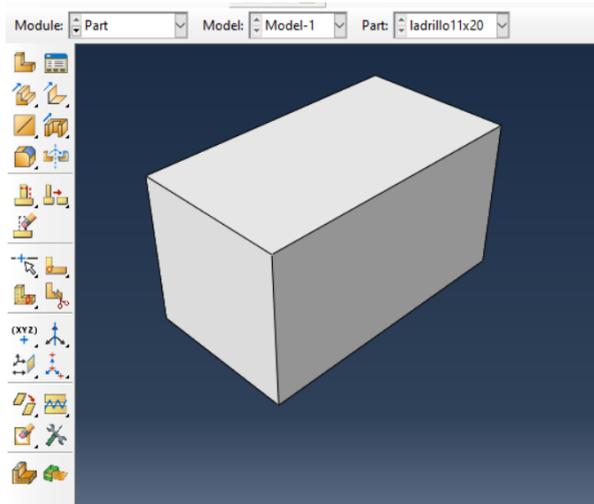


Figura 24. Geometría del Ladrillo

En el módulo PROPERTY se ingresan las propiedades elásticas e inelásticas del material. En cuanto al comportamiento inelástico del material se ha considerado el modelo de daño plástico del concreto. Figura 25

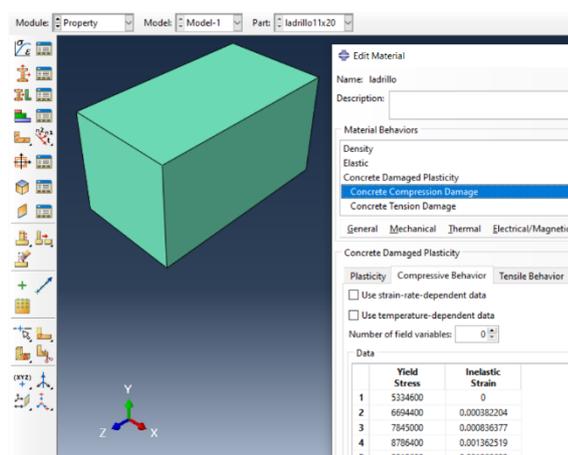


Figura 25. Introduciendo las propiedades del material en el programa

En el módulo INTERACTION se ingresan las propiedades de interacción entre el ladrillo y el mortero. Figura 26

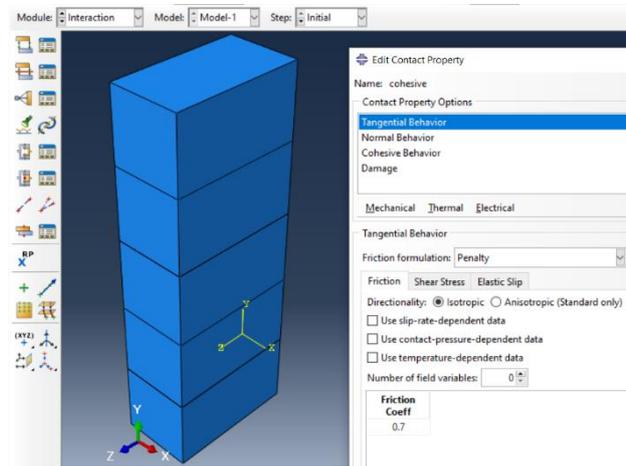


Figura 26. Ingreso de las propiedades del contacto en el programa

En la Figura 27 se muestra el modelado del prisma y de la interface mortero ladrillo.

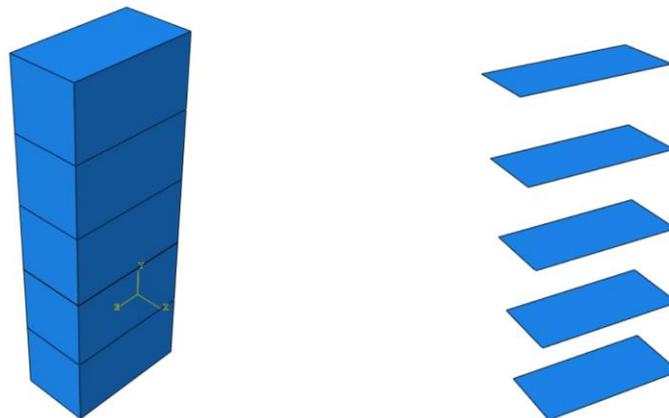


Figura 27. Modelado del prisma y de la interface

Para los ladrillos se utilizaron elementos continuos en 3 dimensiones con 8 nodos e integración reducida (C3D8R), Figura 28.

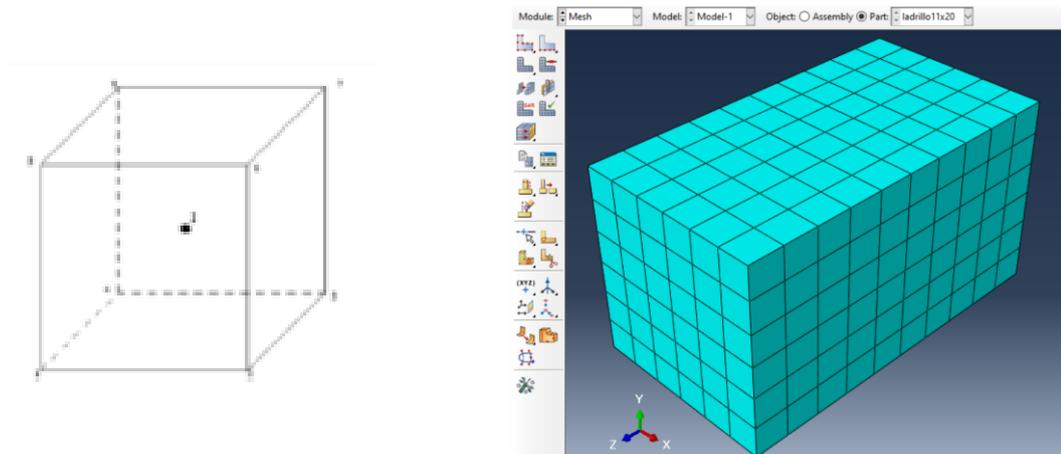


Figura 28. Elemento C3D8R usado para el modelamiento numérico

En el módulo LOAD se ingresaron los desplazamientos, la carga de gravedad y las condiciones de borde en el apoyo en la base. Figura 29

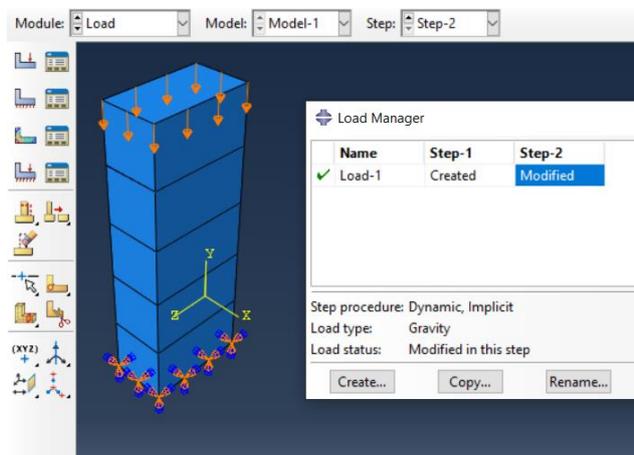


Figura 29. Edición de las condiciones de borde y carga

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.4.1. Análisis de resultados ladrillo ART1

Para hacer la comparación entre el resultado experimental y el resultado del análisis numérico se ha tomado los resultados de un ensayo que sea similar al comportamiento

promedio de los prismas tipo ART1. En la Gráfica 22 se muestra esta curva experimental y también se muestra la curva obtenida mediante el análisis numérico. En la Tabla 18, se muestran los resultados del ensayo de compresión axial realizado en laboratorio.

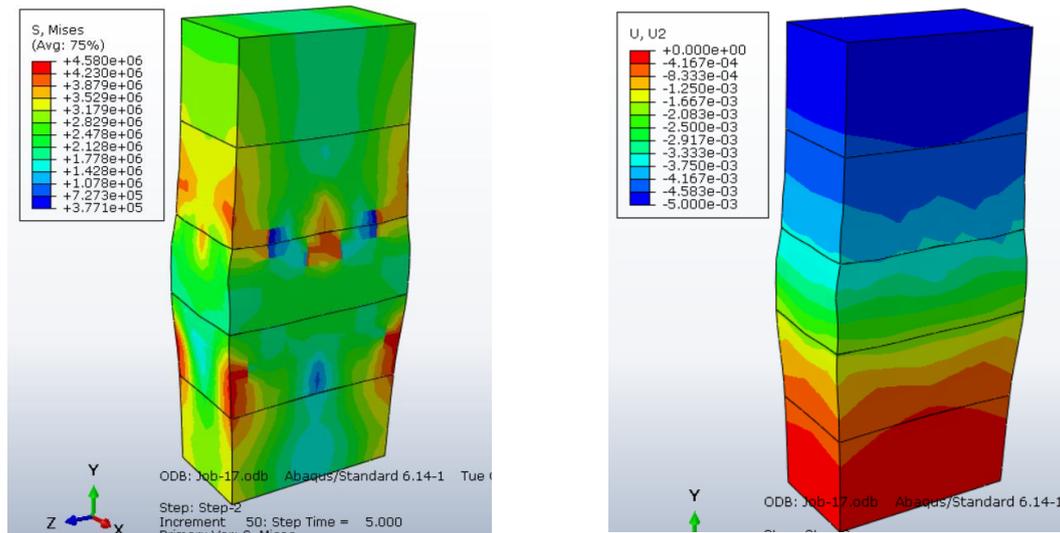
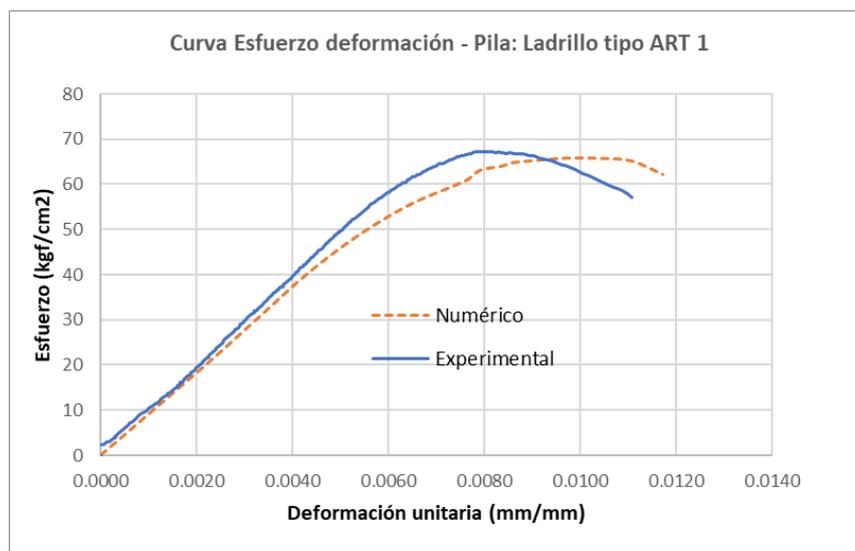


Figura 30. Resultados del prisma ART 1.



Gráfica 22. Curvas esfuerzo deformación: Resultados numérico y experimental (ART1)



Tabla 18. Resultados de ensayo de compresión axial en prismas (ART1)

Datos de la curva esfuerzo Deformacion de especimen ART1 13 P1								
Paso	ϵ (mm/mm)	σ (kgf/cm ²)	Paso	ϵ (mm/mm)	σ (kgf/cm ²)	Paso	ϵ (mm/mm)	σ (kgf/cm ²)
1	0	2.42	81	0.0023	22.64	161	0.004325	43.07
2	0.00005	2.42	82	0.002325	22.86	162	0.00435	43.29
3	0.000075	2.64	83	0.00235	23.08	163	0.004375	43.73
4	0.0001	2.86	84	0.002375	23.29	164	0.0044	43.95
5	0.000125	3.08	85	0.0024	23.51	165	0.004425	43.95
6	0.000175	3.08	86	0.0024	23.73	166	0.00445	44.39
7	0.0002	3.30	87	0.002425	23.95	167	0.004475	44.61
8	0.000225	3.52	88	0.00245	24.17	168	0.0045	44.83
9	0.00025	3.74	89	0.002475	24.39	169	0.004525	45.27
10	0.000275	3.96	90	0.0025	24.61	170	0.00455	45.49
11	0.0003	3.96	91	0.002525	24.83	171	0.0046	45.71
12	0.0003	4.40	92	0.00255	25.05	172	0.004625	45.93
13	0.000325	4.40	93	0.00255	25.27	173	0.00465	46.37
14	0.00035	4.83	94	0.002575	25.71	174	0.004675	46.59
15	0.000375	5.05	95	0.0026	25.93	175	0.0047	47.03
16	0.0004	5.27	96	0.002625	26.15	176	0.004725	47.03
17	0.00045	5.71	97	0.00265	26.37	177	0.00475	47.47
18	0.000475	5.93	98	0.002675	26.59	178	0.004775	47.69
19	0.0005	6.15	99	0.0027	26.81	179	0.0048	47.91
20	0.00055	6.59	100	0.002725	27.03	180	0.004825	48.13
21	0.000575	6.81	101	0.00275	27.25	181	0.00485	48.35
22	0.0006	7.25	102	0.002775	27.47	182	0.004875	48.79
23	0.00065	7.47	103	0.0028	27.91	183	0.0049	48.79
24	0.0007	7.91	104	0.002825	28.13	184	0.004925	49.23
25	0.000725	8.13	105	0.00285	28.13	185	0.004975	49.45
26	0.000775	8.79	106	0.002875	28.35	186	0.004975	49.67
27	0.000825	9.23	107	0.0029	28.79	187	0.005025	49.89
28	0.0009	9.67	108	0.0029	29.01	188	0.00505	50.11
29	0.00095	9.89	109	0.002925	29.23	189	0.005075	50.55
30	0.001	10.55	110	0.002975	29.45	190	0.0051	50.77
31	0.001075	10.99	111	0.002975	29.67	191	0.005125	50.99
32	0.001125	11.43	112	0.003	29.89	192	0.00515	51.20
33	0.0012	11.87	113	0.003025	30.11	193	0.005175	51.64
34	0.00125	12.53	114	0.00305	30.55	194	0.0052	51.64
35	0.0013	12.97	115	0.003075	30.77	195	0.005225	52.08
36	0.001375	13.41	116	0.0031	30.99	196	0.00525	52.30
37	0.0014	13.85	117	0.003125	31.21	197	0.0053	52.52
38	0.001425	13.85	118	0.00315	31.43	198	0.005325	52.74
39	0.001475	14.28	119	0.0032	31.65	199	0.00535	52.96
40	0.0015	14.50	120	0.0032	32.09	200	0.005375	53.18
41	0.0015	14.50	121	0.00325	32.09	201	0.0054	53.40
42	0.001525	14.72	122	0.003275	32.52	202	0.005425	53.62
43	0.00155	14.94	123	0.0033	32.74	203	0.005475	54.06
44	0.001575	15.16	124	0.003325	32.96	204	0.0055	54.28
45	0.0016	15.16	125	0.00335	33.18	205	0.005525	54.50
46	0.0016	15.60	126	0.003375	33.40	206	0.00555	54.72
47	0.001625	15.60	127	0.0034	33.84	207	0.005575	54.94
48	0.00165	15.82	128	0.003425	34.06	208	0.0056	55.38
49	0.00165	16.26	129	0.00345	34.28	209	0.005625	55.60
50	0.001675	16.26	130	0.003475	34.50	210	0.00565	55.82
51	0.0017	16.26	131	0.0035	34.94	211	0.0057	56.04
52	0.001725	16.70	132	0.003525	35.16	212	0.005725	56.26
53	0.001725	16.70	133	0.00355	35.38	213	0.00575	56.48
54	0.00175	17.14	134	0.003575	35.60	214	0.005775	56.70
55	0.001775	17.14	135	0.0036	36.04	215	0.0058	56.92
56	0.001775	17.36	136	0.00365	36.26	216	0.00585	57.14
57	0.0018	17.58	137	0.003675	36.70	217	0.005875	57.36
58	0.001825	17.80	138	0.0037	36.70	218	0.0059	57.58
59	0.00185	17.80	139	0.003725	37.14	219	0.005925	57.80
60	0.001875	18.24	140	0.00375	37.36	220	0.005975	58.24
61	0.001875	18.46	141	0.0038	37.36	221	0.006	58.24
62	0.0019	18.46	142	0.0038	37.80	222	0.006025	58.46
63	0.001925	18.68	143	0.003825	38.02	223	0.00605	58.68
64	0.00195	18.90	144	0.003875	38.46	224	0.006075	58.90
65	0.001975	19.12	145	0.0039	38.68	225	0.006125	59.12
66	0.001975	19.34	146	0.003925	38.90	226	0.00615	59.34
67	0.002	19.56	147	0.00395	39.12	227	0.006175	59.56
68	0.002025	19.78	148	0.003975	39.34	228	0.0062	59.78
69	0.00205	20.00	149	0.004	39.78	229	0.00625	60.00
70	0.002075	20.22	150	0.004025	40.00	230	0.006275	60.21
71	0.0021	20.44	151	0.00405	40.22	231	0.0063	60.43
72	0.002125	20.66	152	0.004075	40.66	232	0.00635	60.43
73	0.002125	20.88	153	0.0041	40.66	233	0.006375	60.65
74	0.00215	21.10	154	0.004125	41.10	234	0.0064	61.09
75	0.002175	21.32	155	0.00415	41.54	235	0.006425	61.09
76	0.0022	21.54	156	0.0042	41.75	236	0.006475	61.53
77	0.002225	21.76	157	0.004225	41.97	237	0.0065	61.75
78	0.00225	21.76	158	0.004225	42.19	238	0.00655	61.75
79	0.00225	22.20	159	0.004275	42.41	239	0.006575	61.97
80	0.002275	22.42	160	0.0043	42.85	240	0.0066	62.19

En la Tabla 19 se muestran los resultados obtenidos experimentalmente y mediante la simulación numérica del ensayo de compresión en el prisma. En cuanto al esfuerzo se ha obtenido un valor experimental de 67.2 kgf/cm² y mediante la simulación numérica un valor de 65.7 kgf/cm² lo cual da un error relativo de 2.23%. En cuanto a la deformación unitaria en el punto de máximo esfuerzo se ha obtenido un valor experimental de 0.0078 mm/mm y mediante la simulación numérica un valor de 0.0099 mm/mm lo cual da un error relativo de 26.92%.

Tabla 19. Resultados del análisis numérico de prismas con ladrillos ART1

	PUNTO DE ESFUERZO MÁXIMO	
	σ máximo (kgf/cm ²)	ϵ (mm/mm)
Numérico	65.7	0.0099
Experimental	67.2	0.0078

3.4.2. Análisis de resultados ladrillo ART3

Para hacer la comparación entre el resultado experimental y el resultado del análisis numérico se ha tomado los resultados de un ensayo que sea similar al comportamiento promedio de los prismas tipo ART3. En la Gráfica 23 se muestra esta curva experimental y también se muestra la curva obtenida mediante el análisis numérico. En la Tabla 20 se muestran los resultados del ensayo de compresión axial realizado en laboratorio.

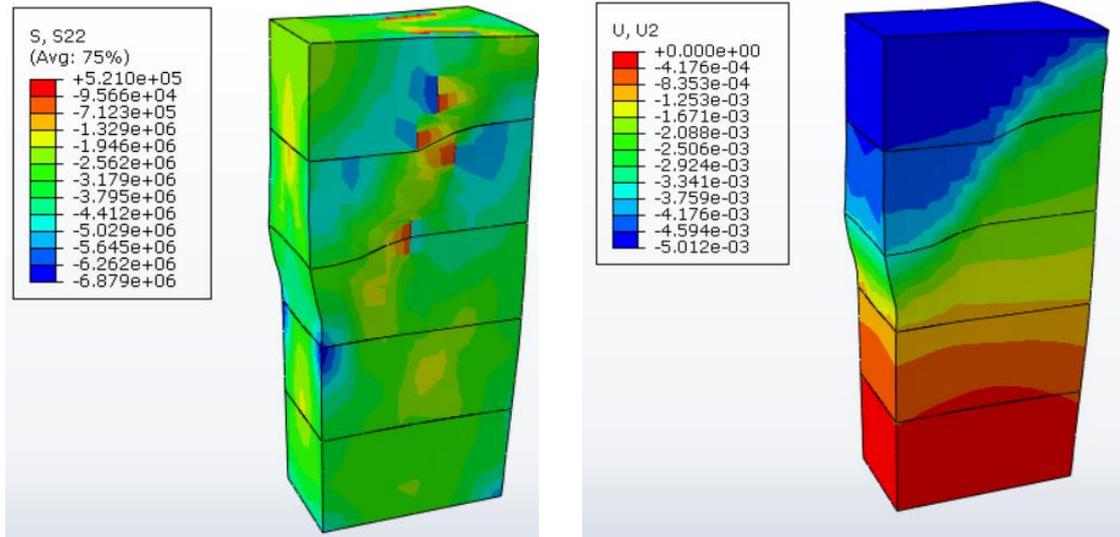
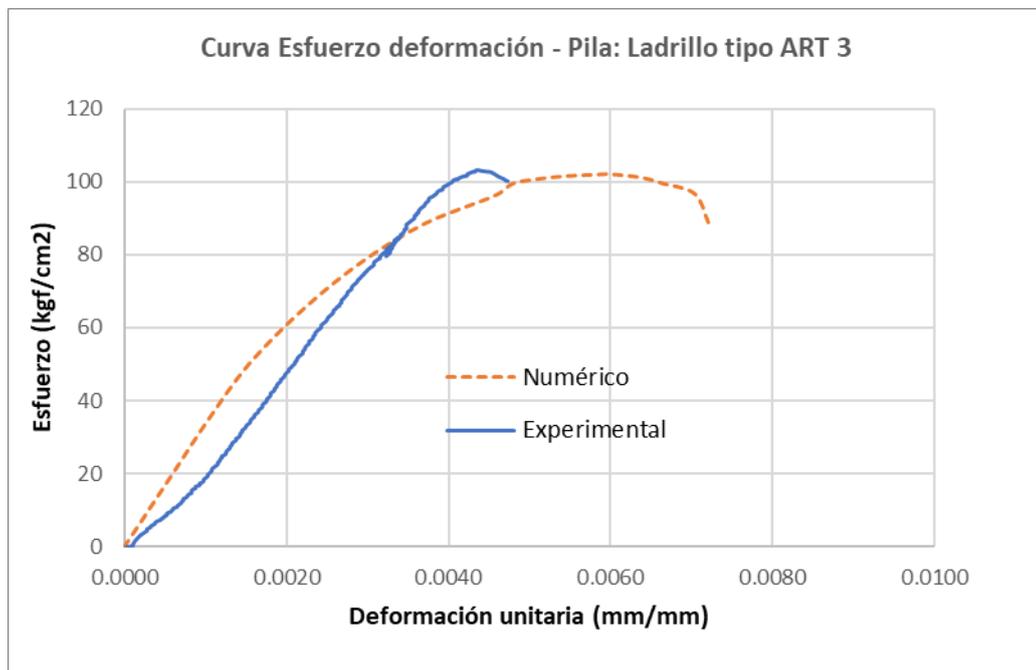


Figura 31. Resultados del prisma ART 3.



Gráfica 23. Curvas esfuerzo deformación: Resultados numérico y experimental (ART3)

Tabla 20. Resultados de ensayo de compresión axial en prismas (ART3)

Datos de la curva esfuerzo Deformacion de especimen ART3 13 P2											
Paso	ϵ (mm/mm)	σ (kgf/cm ²)	Paso	ϵ (mm/mm)	σ (kgf/cm ²)	Paso	ϵ (mm/mm)	σ (kgf/cm ²)	Paso	ϵ (mm/mm)	σ (kgf/cm ²)
1	0	-0.22	71	0.00125	25.93	141	0.0024	59.56	211	0.003475	88.13
2	0.000025	0.00	72	0.001275	26.59	142	0.002425	60.00	212	0.0035	88.56
3	0.00005	0.00	73	0.0013	27.03	143	0.00245	60.65	213	0.003525	89.00
4	0.000075	0.22	74	0.0013	27.47	144	0.00245	61.09	214	0.00355	89.44
5	0.000075	0.22	75	0.001325	27.91	145	0.002475	61.53	215	0.003575	89.88
6	0.000075	0.00	76	0.001325	28.35	146	0.0025	62.19	216	0.003575	90.54
7	0.0001	0.22	77	0.00135	28.79	147	0.0025	62.41	217	0.0036	90.76
8	0.0001	0.22	78	0.001375	29.23	148	0.002525	63.07	218	0.0036	91.20
9	0.0001	0.44	79	0.001375	29.67	149	0.00255	63.51	219	0.003625	91.42
10	0.000125	1.54	80	0.0014	29.89	150	0.002575	64.17	220	0.003625	91.86
11	0.0002	3.30	81	0.001425	30.55	151	0.002575	64.61	221	0.00365	92.52
12	0.000275	4.40	82	0.001425	30.99	152	0.0026	65.05	222	0.003675	92.96
13	0.000275	4.83	83	0.00145	31.43	153	0.002625	65.71	223	0.0037	93.40
14	0.000325	5.49	84	0.00145	31.87	154	0.00265	65.93	224	0.0037	93.62
15	0.000325	5.71	85	0.001475	32.31	155	0.00265	66.37	225	0.003725	94.28
16	0.000375	6.37	86	0.0015	32.96	156	0.002675	66.81	226	0.003725	94.28
17	0.000375	6.59	87	0.0015	33.18	157	0.002675	67.47	227	0.00375	94.72
18	0.0004	7.03	88	0.001525	33.62	158	0.0027	67.91	228	0.00375	95.16
19	0.000425	7.25	89	0.00155	34.06	159	0.002725	68.57	229	0.003775	95.60
20	0.00045	7.47	90	0.00155	34.50	160	0.00275	69.23	230	0.0038	95.82
21	0.00045	7.69	91	0.001575	35.16	161	0.00275	69.66	231	0.003825	96.26
22	0.000475	7.91	92	0.0016	35.60	162	0.002775	70.10	232	0.00385	96.70
23	0.000475	8.13	93	0.0016	36.04	163	0.0028	70.54	233	0.00385	96.92
24	0.0005	8.35	94	0.001625	36.48	164	0.0028	70.98	234	0.003875	97.35
25	0.0005	8.57	95	0.00165	36.92	165	0.002825	71.64	235	0.0039	97.57
26	0.000525	8.79	96	0.00165	37.36	166	0.00285	72.08	236	0.003925	97.79
27	0.000525	9.23	97	0.001675	37.80	167	0.002875	72.74	237	0.003925	98.23
28	0.00055	9.45	98	0.0017	38.24	168	0.002875	72.96	238	0.00395	98.67
29	0.000575	9.67	99	0.0017	38.90	169	0.0029	73.40	239	0.003975	98.89
30	0.000575	9.89	100	0.001725	39.34	170	0.002925	74.06	240	0.004	99.33
31	0.0006	10.33	101	0.00175	39.78	171	0.00295	74.50	241	0.004025	99.55
32	0.0006	10.55	102	0.00175	40.22	172	0.00295	74.72	242	0.00405	99.99
33	0.000625	10.77	103	0.001775	40.88	173	0.002975	75.16	243	0.00405	100.21
34	0.00065	10.99	104	0.0018	41.32	174	0.003	75.82	244	0.0041	100.65
35	0.00065	11.21	105	0.0018	41.97	175	0.003025	76.26	245	0.0041	100.43
36	0.000675	11.65	106	0.001825	42.41	176	0.00305	76.70	246	0.004125	100.87
37	0.0007	12.09	107	0.00185	42.85	177	0.003075	77.14	247	0.00415	101.09
38	0.0007	12.31	108	0.00185	43.29	178	0.003075	77.80	248	0.004175	101.31
39	0.000725	12.75	109	0.001875	43.73	179	0.0031	78.24	249	0.004225	101.53
40	0.000725	13.19	110	0.001875	44.17	180	0.003125	78.67	250	0.004225	101.75
41	0.00075	13.41	111	0.0019	44.83	181	0.00315	78.89	251	0.004225	101.97
42	0.000775	13.85	112	0.001925	45.27	182	0.00315	79.33	252	0.00425	102.19
43	0.000775	14.06	113	0.001925	45.71	183	0.003175	79.99	253	0.004275	102.41
44	0.0008	14.50	114	0.00195	46.15	184	0.0032	80.43	254	0.0043	102.63
45	0.000825	14.72	115	0.001975	46.81	185	0.003225	80.87	255	0.004325	102.63
46	0.000825	15.38	116	0.001975	47.03	186	0.003225	81.31	256	0.004325	102.85
47	0.00085	15.82	117	0.002	47.69	187	0.00325	81.75	257	0.00435	103.07
48	0.000875	16.04	118	0.002025	48.13	188	0.003275	82.19	258	0.0044	102.85
49	0.000875	16.48	119	0.002025	48.57	189	0.0033	82.41	259	0.004475	102.63
50	0.000925	16.92	120	0.00205	49.01	190	0.0033	82.85	260	0.004525	102.41
51	0.000925	17.36	121	0.002075	49.67	191	0.003325	83.07	261	0.004625	101.09
52	0.00095	17.58	122	0.0021	50.11	192	0.003325	83.73	262	0.004675	100.65
53	0.000975	18.02	123	0.0021	50.55	193	0.00335	84.17	263	0.0047	100.21
54	0.000975	18.46	124	0.002125	50.98	194	0.003375	84.61	264	0.004725	99.99
55	0.001	18.90	125	0.002125	51.42	195	0.003225	79.55	265	0.004775	99.77
56	0.001025	19.34	126	0.00215	52.08	196	0.00325	79.99	266	0.004775	99.77
57	0.001025	19.78	127	0.002175	52.52	197	0.003275	80.43	267	0.004775	98.23
58	0.00105	20.22	128	0.0022	52.96	198	0.003275	81.09	268	0.00475	95.82
59	0.001075	20.88	129	0.0022	53.62	199	0.0033	81.75	269	0.0047	94.72
60	0.001075	21.32	130	0.002225	54.06	200	0.0033	82.41	270	0.0047	94.72
61	0.0011	21.76	131	0.002225	54.50	201	0.003325	83.07	271	0.0047	94.72
62	0.001125	22.20	132	0.00225	55.16	202	0.00335	83.73	272	0.0047	94.94
63	0.00115	22.64	133	0.002275	55.60	203	0.003375	84.17	273	0.0047	95.16
64	0.00115	23.08	134	0.002275	56.26	204	0.0034	84.83	274	0.004725	95.38
65	0.001175	23.51	135	0.0023	56.48	205	0.0034	85.27	275	0.00475	95.60
66	0.001175	23.95	136	0.002325	57.14	206	0.003425	85.71	276	0.00475	95.82
67	0.0012	24.39	137	0.002325	57.58	207	0.00345	86.37	277	0.004775	96.04
68	0.0012	24.83	138	0.00235	58.02	208	0.00345	86.81	278	0.0048	96.04
69	0.001225	25.05	139	0.00235	58.46	209	0.003475	87.03	279	0.0048	95.82
70	0.00125	25.49	140	0.002375	59.12	210	0.003475	87.47	280		

En la Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos experimentalmente y mediante la simulación numérica del ensayo de compresión en el prisma. En cuanto al esfuerzo se ha obtenido un valor experimental de 103.10 kgf/cm² y mediante la simulación numérica un valor de 102.2 kgf/cm² lo cual da un error relativo de 0.83%. En cuanto a la deformación unitaria en el punto de máximo esfuerzo se ha obtenido un valor experimental de 0.0043 mm/mm y mediante la simulación numérica un valor de 0.0060 mm/mm lo cual da un error relativo de 39.53%.

Tabla 21. Resultados del análisis numérico de prismas con ladrillos ART3

	PUNTO DE ESFUERZO MÁXIMO	
	σ máximo (kgf/cm ²)	ϵ (mm/mm)
Numérico	102.2	0.0060
Experimental	103.1	0.0043



CONCLUSIONES

- Se ha obtenido experimentalmente valores para la cohesión y para el ángulo de fricción interna y para la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión axial f_m para la albañilería con ladrillo artesanal.
- Para las unidades se han obtenido experimentalmente las curvas esfuerzo deformación en compresión y en tracción, los cuales se han utilizado en la simulación numérica.
- Los ladrillos artesanales estudiados en la presente investigación presentan altos valores de succión, lo cual podría afectar el proceso de fraguado por tanto también la resistencia en la interface mortero ladrillo.
- El comportamiento en compresión axial obtenido en la simulación numérica es similar al comportamiento obtenido experimentalmente. El modelo constitutivo de daño plástico del concreto predice, con una buena aproximación, el comportamiento en compresión de la albañilería no confinada elaborada con ladrillo artesanal.
- Posteriormente se puede realizar ensayos de laboratorio adicionales para mejorar los valores de los parámetros utilizados en la simulación y realizar un análisis con un micro modelo. Asimismo, se puede realizar el análisis del comportamiento en compresión y en corte de la albañilería elaborada con ladrillo artesanal no confinada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bolhassani M. (2015), Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials*, 83 159-173
- CISMID. <http://www.cismid.uni.edu.pe/base-de-datos-del-laboratorio-de-estructuras-satreps-project-jica-gobierno-del-peru-ppr-068/>
- Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) *Abaqus Software*, Providence, RI, USA,
- Izquierdo T. (1995) *Correlación para determinar las propiedades físicas y mecánicas de unidades o especímenes de albañilería*
- Lavado L, Gallardo J, Honma C, Cardenas A, Acuña C. (2020) Experimental analysis of strengthened tubular bricks masonry used in informal dwellings, *17 WCEE*, Sendai Japan, September
- Lavado L, Gallardo J, Honma C. (2020) Experimental and numerical analysis of behaviour in compression and shear of handmade clay brick masonry, *17 WCEE*, Sendai Japan
- Lavado L, Gallardo J. (2019) Shear strength of brick mortar interface for masonry in Lima city. *TECNIA* Vol. 29 N° 2
- Lavado L, Taira J, Gallardo J. (2014) Current state of masonry properties material on emerging zones in Lima city. *Journal of Disaster Research* Vol. 9 N° 6
- Lourenço P. (1996) *Computational Strategies For Masonry Structures*, Tesis de doctorado Universidad Tecnológica de Delft
- Lubliner J. Oliver J. Oller S., E. Oñate (1989) A plastic damage model for concrete. *Int. J. Solids Structures* Vol 25, No 3 pp 299-326
- NTP 334.090 (2013) *Cementos Portland Adicionados. Requisitos*
- NTP 399.605 (2013) *UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Método de ensayo para la determinación de la resistencia en compresión de prismas de albañilería*
- NTP 399.610 (2013) *UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Especificación normalizada para morteros*
- NTP 399.610 (2013) *UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Especificación normalizada para morteros*
- TP 399.613 (2005) *UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería*
- NTP 399.621 (2015) *UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Método de ensayo de compresión diagonal en muretes de albañilería*



- NTP.331.017 (2003) *UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Ladrillos de arcilla usados en albañilería. Requisitos*
- Oller S. Oliver J. Lubliner J. Oñate E. (1988): Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* Vol. 4,4 , 397-431
- Santo C. Alvarenga R. Ribeiro J. Castro L. Silva R. Santos A, Nalon G. (2017): Numerical and experimental evaluation of masonry prisms by finite element method. *Revista Ibracon de Estructuras e Materiales*, Vol 10, Number 2, 477-508
ISSN
- SENCICO. (2006) Norma E-070 “Albañilería”
- Y. Tao, J. F. Chen (2015), Concrete Damage Plasticity Model for Modeling FRP-to-Concrete Bond Behavior, *ASCE 04014026-1*, J. Compos. Constr. 2015.19



ANEXOS

Anexo 1. ENSAYOS DE LAS UNIDADES



Anexo 2. ENSAYOS DE MORTEROS



Anexo 3. ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL



Anexo 4. ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAGONAL



Anexo 5. ENSAYOS DE CORTE EN LA UNIÓN MORTERO LADRILLO

